

GICC APR 2010 – N° subvention 2100214938

PALUCLIM

Émergence des vecteurs du paludisme
en zone rurale du Sahel et stratégies d'adaptation
Impacts des facteurs climatiques
Application à la région de Nouna au Burkina-Faso



Rapport final
avril 2014

Résumé

Le projet **Paluclim** proposait d'appliquer l'approche conceptuelle (CA) de la Télé-épidémiologie reliant climat, environnement et santé, au paludisme rural dans la région sahélienne de Nouna au Burkina Faso. La proposition était donc d'étudier les facteurs environnementaux et climatiques favorables à l'émergence des moustiques/vecteurs du paludisme et de modéliser le risque vectoriel, la première étape biologique du risque de paludisme.

Les objectifs du projet étaient de produire et valider des cartes dynamiques du risque environnemental, puis d'étudier les processus d'adaptation de la lutte face aux risques prédits. L'objet était aussi d'étudier l'impact de la variabilité du climat, allant du saisonnier jusqu'aux basses fréquences, comprenant les tendances et les changements climatiques, sur la prévision de ces risques.

Pour atteindre ces objectifs, le projet Paluclim a mobilisé sur trente-six mois les efforts des équipes du Centre National d'Etudes Spatiales (CNES), de Météo France, de l'Institut de Santé Publique de l'Université d'Heidelberg (Allemagne) et du Centre de Recherche en Santé de Nouna (CRSN) représentant du Ministère de la Santé du Burkina Faso dans notre zone d'étude. Il a bénéficié des travaux précédemment réalisés par les partenaires en entomologie, en science de l'environnement et du climat, et en télé-épidémiologie.

Les partenaires du projet Paluclim ont mené un travail scientifique multidisciplinaire, comprenant la collecte et l'organisation des campagnes de mesures in-situ, la construction d'une base de données et d'un SIG, l'analyse des images satellites, et la modélisation bio-mathématique du risque entomologique. Par ce travail, il a été montré :

- qu'il est possible de construire, sur la base de données satellitaires et in situ, un modèle de prédiction des gîtes larvaires permettant la mise à disposition opérationnelle de cartes dynamiques de productivité larvaire à l'échelle des villages,
- qu'il est possible de mettre en place et d'appliquer une stratégie larvicide ciblée grâce à ces cartes de productivité larvaire.

Le fait que cette stratégie larvicide n'ait pas eu d'impact sur les densités de vecteurs adultes n'est très probablement pas lié à des facteurs dépendant du processus de ciblage des interventions qui a été mis en place et ne remet pas en cause l'utilisation d'une stratégie larvaire ciblée. L'apport de ces cartes de risque entomologique a été perçu sur le terrain par les acteurs de la lutte antipaludique comme un réel outil d'aide à la décision. Si cette première étude dans la région a montré la faisabilité d'un traitement anti-larvaire ciblé s'appuyant sur ces cartes de productivité larvaire, une opération à plus grande échelle est nécessaire et prévue afin de mesurer quantitativement l'efficacité et l'efficacité d'une telle stratégie.

D'autre part, la pluviométrie étant un facteur déterminant de la densité de vecteurs (facteur pris en compte dans la construction de cartes de risque entomologique), une étude de l'évolution du risque palustre en fonction de la variabilité spatio-temporelle du climat a été menée. Pour évaluer l'incidence des conditions climatiques sur le risque palustre dans sa globalité, il a été nécessaire d'utiliser un modèle d'impact. Le modèle retenu est une adaptation du modèle de Craig. L'analyse climatique s'est faite à différentes échelles spatio-temporelles (échelle saisonnière, échelle régionale du changement climatique, et du quasi-biennal aux basses fréquences). Il en ressort que l'augmentation des températures devrait conduire à une réduction notable du risque palustre. Aucune variabilité de pluie significative n'a pu être décelée jusqu'au milieu du 21^{ème} siècle, en sachant la difficulté des modèles à reproduire la variabilité des pluies de mousson sur l'Afrique de l'Ouest.

Executive summary

The **Paluclim** project was to apply the Tele-epidemiology conceptual approach (CA) linking climate, environment and vector-borne diseases such as Malaria in the Sahelian region of Nouna (Burkina Faso). It was proposed to study the impacts of environment/climate variability on Malaria entomological risk, a first step for risks of Malaria outbreaks and then to analyze impacts from risks' forecasting.

The project objectives were to provide and validate dynamic entomological risk maps, then to study adaptation processes for controlling management, i.e., addressing the predicted risk, and to study the impacts of climate variability (from seasonal to low frequency climatic signals, including tendencies and climate change) on risks' forecasting.

To achieve these objectives, the Paluclim project integrated efforts from several teams and partners: the French Space Agency (CNES), Météo-France, Public Health Institute of the University Hospital of

Heidelberg (Germany), Centre de Recherche en Santé de Nouna (Burkina Faso) representing the Health Ministry. As such it benefited from previous expertise and results obtained by the different partners in entomology, climate, environmental sciences, and in tele-epidemiology. In this work it was shown that;

- based upon satellite and in-situ data it was possible to build an operational model to predict location of larvae sites and distribute dynamic maps on larval productivity for the local villages ;
- based upon the larval productivity maps a targeted larvicide strategy could be implemented.

The fact that the larvicide strategy had very little impacts on the adult vectors' density does not seem to be linked with the targeting factors which were used. As such a targeted larvae strategy is still valid. The added-values from the use of entomological risk maps were obvious in terms of additional element for decision makers. Even if at the regional level, the use of larval productivity maps for larvicide treatment was perceived as extremely positive, a strategy on a larger scale is still necessary to demonstrate objectively the efficiency of such approach.

As of today, rainfall is the confounding parameter for the knowledge of vectors' density (which is used for the making of entomological risk maps). The malaria risks as a function of the weather/climate spatio-temporal variability was undertaken. A model impacts was developed based upon the Graig's model, particularly valid when resources are limited. The climate analyses were done for different temporal scales (i.e., seasonal, quasi-biennial, inter-annual, low-frequencies and climate change). The model could thus be used immediately on a operational mode.

It was also found that the new confounding factor for the upcoming years will be the temperature increase leading to a decrease of Malaria risks for at least the next 50 years, all knowing that models have a hard time to reproduce rainfall variability in details for the near future.

TABLE DES MATIERES

1. RAPPEL DES OBJECTIFS, DES ACTIONS A MENER ET DU CALENDRIER DES TRAVAUX.....	9
1.1. OBJECTIFS DU PROJET PALUCLIM	9
1.2. RESULTATS ATTENDUS	17
1.3. CALENDRIER DES TRAVAUX.....	17
2. DONNEES EXISTANTES.....	18
2.1. ZONE D'ETUDE	18
2.2. LES DONNEES HISTORIQUES	19
2.2.1. Entomologie	19
2.2.2. Météorologie	20
2.3. DONNEES ET PRODUITS ISSUS DU SPATIAL	20
3. CAMPAGNE DE MESURES 2011	22
3.1. ENTOMOLOGIE	22
3.1.1. Zone d'étude, relevé de terrain et période d'étude.....	22
3.1.2. Collections d'eau et gîtes larvaires.....	23
3.1.3. Collecte de moustiques adultes	25
3.1.4. Déroulement des collectes entomologiques.....	25
3.1.5. Principaux résultats et état d'avancement des analyses.....	25
3.2. OCCUPATION DU SOL AUTOUR DES VILLAGES	28
3.3. METEOROLOGIE	28
3.4. TELEDETECTION	31
4. CAMPAGNE DE MESURES 2012	32
5. ANALYSE CLIMATIQUE.....	34
5.1. CLIMATOLOGIE DE LA ZONE DE NOUNA (1983-2011).....	34
5.2. ANALYSE DU CLIMAT AUX DIFFERENTES ECHELLES SPATIO-TEMPORELLE	37
5.2.1. Analyse climatique du risque palustre de la période 1983-2011.....	37
5.2.2. Variations climatiques naturelles des précipitations.....	41
5.2.3. Prévisibilité saisonnière du risque palustre	42
5.2.4. La vulnérabilité climatique future de la région de Nouna au paludisme.....	47
6. PRODUCTION DES CARTES DE RISQUE ENTOMOLOGIQUE	53
6.1. DONNÉES ET SYSTÈME D'INFORMATION GÉOGRAPHIQUE	53
6.1.1. Données satellites.....	53
6.1.2. Traitement des images.....	54
6.1.3. Données météorologiques	55
6.1.4. Système d'Information Géographique.....	55
6.2. CARTOGRAPHIE DES COLLECTIONS D'EAU	56
6.2.1. Méthode.....	56
6.2.2. Résultats/Discussion	57
6.3. CARTOGRAPHIE DES GITES LARVAIRES.....	59
6.3.1. Méthode.....	59
6.3.2. Résultats/ Discussion	60
6.4. CARTOGRAPHIE DES DENSITES D'ADULTES	61
6.4.1. Résultats/ Discussion	62
6.5. VALIDATION DES CARTES DE PREDICTION DES COLLECTIONS D'EAU.....	63
6.6. VALIDATION DES CARTES DE PREDICTION DES GITES LARVAIRES	64
7. STRATEGIE D'ADAPTATION AU RISQUE PALUDIQUE	64
7.1. TEST DE L'EFFICACITE ET REMANENCE SEMI-TERRAIN	65
7.1.1. Protocole pour trouver le dosage de Bti applicable sur les gîtes larvaires.....	65
7.1.2. Résultats du test semi terrain	65
7.2. APPLICATION DU Bti SUR LE TERRAIN	67
7.2.1. Protocole utilisé pour une stratégie larvicide orientée	67
7.2.2. Impact du traitement Bti sur les densités des Anophèles.....	69
8. VALORISATION	72
CONCLUSIONS	72
BIBLIOGRAPHIE	74
ANNEXES	79

LISTE DES ILLUSTRATIONS

LISTE DES TABLEAUX

TABEAU 1 : ESPECES DES MOUSTIQUES DANS LA REGION D'ETUDE. CAPTURES DANS DES PIEGES LUMINEUX DANS 12 VILLAGES ENTRE LE 2 SEPTEMBRE ET LE 23 OCTOBRE 2009 D'UN TOTAL DES MOUSTIQUES DE 23.939	19
TABEAU 2: EXEMPLES D'INDICES DE TELEDETECTION UTILISES POUR L'ETUDE.....	21
TABEAU 3: CARACTERISTIQUES DE LA COLLECTE DES DONNEES METEOROLOGIQUES	28
TABEAU 4 : CARACTERISTIQUES DES DONNEES METEOROLOGIQUES	29
TABEAU 5 : CORRELATIONS ENTRE ESTIMATION ET OBSERVATIONS POUR LES DIFFERENTS VILLAGES POUR LES PRECIPITATIONS ET LES TEMPERATURES MINIMALES ET MAXIMALES	31
TABEAU 6 : CONDITIONS FAVORABLES AU DEVELOPPEMENT DU PALUDISME.....	38
TABEAU 7 : ADAPTATION LOCALE DE LA PREVISION ARPEGE - DATES D'INITIALISATION ET SERIE DETERMINISTE ...	45
TABEAU 8 : LES DIFFERENTS MODELES TESTES ET LEURS PREDICATEURS.....	45
TABEAU 9 : AIRES SOUS LA COURBE ROC DES PREVISIONS EN FONCTION DU MOIS D'INITIALISATION	46
TABEAU 10 : CRITERES D'EVALUATION DE LA CLASSIFICATION	55
TABEAU 11: FACTEURS ENVIRONNEMENTAUX ASSOCIES SIGNIFICATIVEMENT A LA PRESENCE D'EAU MAXIMALE DANS LES CARRES DE 10M. REGRESSION LOGISTIQUE AVEC EFFET ALEATOIRE AU NIVEAU VILLAGE.....	57
TABEAU 12: FACTEURS ENVIRONNEMENTAUX ET METEOROLOGIQUES ASSOCIES SIGNIFICATIVEMENT AUX DENSITES LARVAIRES D'ANOPHELES DANS LES COLLECTIONS D'EAU. REGRESSION LINEAIRE AVEC EFFET ALEATOIRE AU NIVEAU COLLECTION D'EAU.	60
TABEAU 13. RECHERCHE DE L'ASSOCIATION ENTRE LA « PRODUCTIVITE LARVAIRE » ET LE NOMBRE D'ANOPHELES CAPTURES PAR POSTE DE CAPTURE. REGRESSION BINOMIALE NEGATIVE AVEC EFFET ALEATOIRE AU NIVEAU DU VILLAGE.	62
TABEAU 14. RECHERCHE DE L'ASSOCIATION ENTRE LA « PRODUCTIVITE LARVAIRE » ET LE NOMBRE D'ANOPHELES CAPTURES PAR ZONE (3 ZONES DANS CHAQUE VILLAGE). REGRESSION BINOMIALE NEGATIVE AVEC EFFET ALEATOIRE AU NIVEAU DU VILLAGE.	62
TABEAU 15. RECHERCHE DE L'ASSOCIATION ENTRE LA « PRODUCTIVITE LARVAIRE » ET LE NOMBRE D'ANOPHELES CAPTURES PAR VILLAGES. REGRESSION BINOMIALE NEGATIVE AVEC EFFET ALEATOIRE AU NIVEAU DU VILLAGE..	63
TABEAU 16 : RESULTATS DE LA VALIDATION DES CARTES DE PREDICTION DES COLLECTIONS D'EAU	63
TABEAU 17 : EFFET DE DIFFERENTES CONCENTRATIONS DE WDG BTI SUR DES LARVES DES ANOPHELES ET LE POURCENTAGE DE REDUCTION APRES L'APPLICATION DU LARVICIDE. C=CONTROLE, T1=0,2MG/L, T2=0,4MG/L, T3=0,8MG/L, T4=1,0MG/L. ENTRE LE 8 OCTOBRE ET LE 5 NOVEMBRE2012. CALCUL DE LA REDUCTION EN UTILISANT LA FORMULE DE MULLA (SU AND MULLA 1999).....	67
TABEAU 18 : VALEURS MOYENNES DU NOMBRE D'ANOPHELES SPP. FEMELLES CAPTURES PAR NUIT ET PAR PERSONNE DANS LES VILLAGES TRAITES PAR BTI ET DANS LES ILLAGES TEMOINS (SANS TRAITEMENT). L'ECART TYPE ET LE NOMBRE DE MESURES EFFECTUEES SONT AUSSI INDIGUES. TROIS PERIODES SONT CONSIDEREES : JUILLET-AOUT OU AUCUN TRAITEMENT N'A PRIS PLACE, SEPTEMBRE-OCTOBRE OU LA MOITIE DES 10 VILLAGES A ETE TRAITE AVEC LE BTI (2 A 4 APPLICATIONS PAR VILLAGE CONSIDERE) ET DECEMBRE OU DE NOUVEAU AUCUN TRAITEMENT N'A EU LIEU. LES VALEURS SONT DONNEES POUR LES CAPTURES FAITES A L'INTERIEUR, A L'EXTERIEUR ET POUR LES DEUX ENSEMBLES. LES MOYENNES ENTRE VILLAGE TRAITE ET NON-TRAITES NE DIFFERENT PAS DE FAÇON STATISTIQUEMENT SIGNIFICATIVES AU COUR DE LA PERIODE D'ETUDE.	71

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1 : SCHEMA DE L'APPROCHE CONCEPTUELLE DE TELE-EPIDEMIOLOGIE	12
FIGURE 2 : CYCLE DE TRANSMISSION DU PALUDISME	13
FIGURE 3 : METHODOLOGIE DE CARTOGRAPHIE OPERATIONNELLE ET DYNAMIQUE	14
FIGURE 4 : CALENDRIER DU PROJET	17
FIGURE 5 : LOCALISATION DE LA ZONE D'ETUDE (CARRE ROUGE)	18
FIGURE 6 : NOMBRE ET ESPECE DE MOUSTIQUES ADULTES CAPTURES PAR PIEGES LUMINEUX ENTRE LE 2 SEPTEMBRE ET LE 23 OCTOBRE 2009	19
FIGURE 7 : IMAGE SPOT-5 DU 9 SEPTEMBRE 2008	20
FIGURE 8 : REPRESENTATION DES 10 VILLAGES DE L'ETUDE REPARTIS DANS LE DISTRICT SANITAIRE DE NOUNA	22
FIGURE 9 : ZONES D'INVESTIGATION POUR LES MESURES ENTOMOLOGIQUES	23
FIGURE 10 : EXEMPLE D'UNE GRANDE COLLECTION D'EAU DANS LA REGION DE NOUNA	24
FIGURE 11 : EVOLUTION DU NOMBRE DE LARVES D'ANOPHELES AU COURS DE LA SAISON DES PLUIES 2011	26
FIGURE 12 : DENSITE LARVAIRE DANS LES 10 VILLAGES D'ETUDE (MOYENNE PAR VILLAGE)	26
FIGURE 13 : DISTRIBUTION EXTERIEURE DES DIFFERENTS GENRES DE MOUSTIQUES FEMELLES PAR VILLAGE ET DATE ENTRE LE 26 FEVRIER ET LE 27 SEPTEMBRE 2011 DANS LES 10 VILLAGES D'ETUDE	27
FIGURE 14 : ENQUETE SUR L'OCCUPATION DU SOL AUTOUR DES VILLAGES DE L'ETUDE	28
FIGURE 15 : DONNEES (POINTS DE GRILLES ET STATIONS) UTILISEES AU COURS DU PROCESSUS D'ESTIMATION. LE RECTANGLE BLEU DESIGNER LA ZONE D'ETUDE DE NOUNA	30
FIGURE 16 : GRAPHIQUES EN NUAGES DE POINTS POUR LA STATION DE NOUNA POUR LES PRECIPITATIONS ET LES TEMPERATURES MINIMALES ET MAXIMALES	31
FIGURE 17 : ORGANISATION DES COLLECTES ENTOMOLOGIQUES EN 2012	33
FIGURE 18 : PLUVIOMETRIE ET BILAN DE LA COLLECTE D'ANOPHELES ADULTES SUR LE VILLAGE DE KAMADENA	34
FIGURE 19 : CARTES DE LA CLIMATOLOGIE MENSUELLE DU CUMUL DES PRECIPITATIONS EN MM POUR LA ZONE DE NOUNA (4.1/3.5°OUEST ET 12.4/13°NORD) POUR LA PERIODE 1983-2011	35
FIGURE 20 : CARTES DE LA CLIMATOLOGIE MENSUELLE DES TEMPERATURES MINIMALES EN °C POUR LA ZONE DE NOUNA (4.1/3.5°OUEST ET 12.4/13°NORD) POUR LA PERIODE 1983-2011	35
FIGURE 21 : CARTE DE LA CLIMATOLOGIE MENSUELLE DES TEMPERATURES MAXIMALES EN °C POUR LA ZONE D'ETUDE DE NOUNA (4.1/3.5°OUEST ET 12.4/13°NORD) POUR LA PERIODE 1983-2011	36
FIGURE 22 : CARTES DE LA CLIMATOLOGIE MENSUELLE DE L'HUMIDITE RELATIVE EN % POUR LA ZONE D'ETUDE DE NOUNA (4.1/3.5°OUEST ET 12.4/13°NORD) POUR LA PERIODE 1983-2011	36
FIGURE 23 : - CLIMATOLOGIE ANNUELLE DE LA ZONE DE NOUNA (SERIE _z) CALCULEE SUR LA PERIODE 1983-2011. EN NOIR (ORANGE) EST REPRESENTE L'EVOLUTION DU CUMUL MENSUEL DES PRECIPITATIONS (DE LA MOYENNE MENSUELLE L'HUMIDITE RELATIVE) AXES DE ORDONNEES DE GAUCHE. EN ROUGE (BLEU) EST REPRESENTE L'EVOLUTION DE LA MOYENNE MENSUELLE DES TEMPERATURES MAXIMALES (MINIMALES) AXE DES ORDONNEES DE DROITE	37
FIGURE 24 : CARTOGRAPHIE TEMPORELLE DES CONDITIONS CLIMATIQUES FAVORABLES A L'APPARITION DU PALUDISME	40
FIGURE 25 : EVOLUTION DE LA VALEUR DE L'INDICE DES CONDITIONS DE PRECIPITATIONS FAVORABLES AU DEVELOPPEMENT DU PALUDISME DE 1983 A 2012. LA PERIODE APRES 1996 CORRESPOND A DES INDICES > 3.	41
FIGURE 26 : PROBABILITE MENSUELLE DE DEPASSEMENT DU SEUIL 80MM DE PRECIPITATION POUR LA ZONE DE NOUNA EN UTILISANT LA CLIMATOLOGIE DES PRECIPITATIONS POUR LA PERIODE 1983-2011. PROBABILITE INFERIEURE A 0.5 : PAS DE DEPASSEMENT / PROBABILITE EGALE OU SUPERIEURE A 0.5 DEPASSEMENT DU SEUIL.	43
FIGURE 27 : POURCENTAGE MENSUEL DE PREVISIONS CORRECTES POUR LA PERIODE 1983-2011 EN UTILISANT LA CLIMATOLOGIE	43

FIGURE 28 : PROBABILITE MENSUELLE DE DEPASSEMENT DU SEUIL 80MM DE PRECIPITATION POUR LA ZONE DE NOUNA EN UTILISANT LA CLIMATOLOGIE DES PRECIPITATIONS POUR LA PERIODE 1983-2011 DECOMPOSEE SELON LA PHASE DE L'AMO. COURBE ROUGE (BLEUE) PROBABILITE A UTILISER LORS DES PHASES NEGATIVES (POSITIVES) DE L'AMO. PROBABILITE INFERIEURE A 0.5 : PAS DE DEPASSEMENT / PROBABILITE EGALE OU SUPERIEURE A 0.5 DEPASSEMENT DU SEUIL.	43
FIGURE 29 : POURCENTAGE MENSUEL DE PREVISIONS CORRECTES POUR LA PERIODE 1983-2011 EN UTILISANT LA CLIMATOLOGIE (COURBE ROUGE) ET LA CLIMATOLOGIE DECOMPOSEE SELON LES PHASES DE L'AMO (COURBE ORANGE)	44
FIGURE 30 : COURBE ROC DES PREVISIONS EN FONCTION DU MOIS D'INITIALISATION.	46
FIGURE 31 : EVOLUTION DU BILAN RADIATIF DE LA TERRE, EN WM-2 SUR LA PERIODE 1850-2250. APRES 2006, LES TRAITS CONTINUS REPRESENTENT LES NOUVEAUX SCENARIOS ET LES TRAITS POINTILLES LES ANCIENS SCENARIOS (GIEC, 2001 ET 2007). FIGURE CREEE PAR STEPHANE SENESI (CNRM-GAME, METEO-FRANCE/CNRS).....	47
FIGURE 32 : EVOLUTION DE L'INDICE POUR LES PRECIPITATIONS INDP (HAUT) ET LES TEMPERATURES INDT (BAS) SUR LA PERIODE HISTORIQUE APRES AJUSTEMENT QUANTILE-QUANTILE POUR LES DONNEES SIMULEES. EN ROUGE, LES OBSERVATIONS DE NOUNA, EN BLEUE LA MOYENNE DES SIMULATIONS HISTORIQUES, EN GRIS LA DISPERSION DES MODELES AUTOUR DE LA MOYENNE.....	48
FIGURE 33 : COURBE DE DENSITE DE PROBABILITE DE L'INDICE INDP POUR LA PERIODE 1983-2005 AVEC PRISE EN COMPTE DE L'INFLUENCE DE L'AMO. EN ROUGE (ORANGE) COURBE DES OBSERVATIONS CORRESPONDANT AUX ANNEES OU L'AMO EST DANS UNE PHASE POSITIVE (NEGATIVE). EN BLEU FONCE (CLAIR) COURBE DE LA MOYENNE DES SIMULATIONS CORRESPONDANT AUX ANNEES OU L'AMO EST DANS UNE PHASE POSITIVE (NEGATIVE). LA ZONE EN GRIS FONCE (CLAIR) CORRESPOND A LA DISPERSION AUTOUR DE LA MOYENNE SIMULEE LORS DES PHASES POSITIVE (NEGATIVE) DE L'AMO.....	49
FIGURE 34 : EVOLUTION MOYENNE (ET DISPERSION QUI L'ACCOMPAGNE) DE LA VALEUR ANNUELLE DE L'INDICE DES CONDITIONS FAVORABLES DE PRECIPITATION INDP (GAUCHE) ET DE TEMPERATURE INDT (DROITE) AU DEVELOPPEMENT DU PALUDISME DE 1983 A 2100. POST-2005, LES EVOLUTIONS SONT LE RESULTAT DU SCENARIO DE CHANGEMENT CLIMATIQUE RCP45 (HAUT) ET RCP85 (BAS). LES PARTIES BLEUES (BLEUE CLAIRE) DES COURBES SONT POUR LES PERIODES AU-DESSUS (EN-DESSOUS) DE LA MOYENNE QUI A ETE CALCULE SUR LA PERIODE HISTORIQUE 1983 A 2005. VOIR LES DEFINITIONS DES 'REPRESENTATIVE CONCENTRATION PATHWAYS' RCP45 ET RCP85 SUR LE SITE : HTTP://WWW.PIK-POTSDAM.DE/~MMALTE/RCPS/	49
FIGURE 35 : EVOLUTION DE LA TEMPERATURE MAXIMALE MOYENNE ANNUELLE ET POUR L'ENSEMBLE MULTI-MODELES. JUSQU'EN 2005 L'EVOLUTION EST COMMUNE PUIS LES TEMPERATURES EVOLUENT EN FONCTION DES SCENARIOS RCP45 ET RCP85.	50
FIGURE 36 - COURBES DE DENSITE DE PROBABILITE DE L'INDICE INDP POUR LES PERIODES 2010-2040 / 2040-2070 / 2070-2100 POUR LES SCENARIOS RCP45 (HAUT) ET RCP85 (BAS). L'AXE DES ABSCISSES INDIQUE LES VALEURS DE L'INDICE INDP. EN BLEU FONCE COURBE DE LA MOYENNE DES SIMULATIONS ET LA ZONE EN GRIS FONCE CORRESPOND A LA DISPERSION AUTOUR DE LA MOYENNE SIMULEE.....	51
FIGURE 37 : COURBE DE DENSITE DE PROBABILITE DE L'INDICE INDT POUR LA PERIODE HISTORIQUE (HAUT, VOIR FIGURE 33 POUR LES DETAILS) ET POUR LES PERIODES 2010-2040 / 2040-2070 / 2070-2100 POUR LES SCENARIOS RCP45 (MILIEU) ET RCP85 (BAS) VOIR FIGURE 36 POUR LES DETAILS.....	52
FIGURE 38: VILLAGES D'ETUDES (8) REPRESENTES SUR UNE IMAGE SATELLITE SPOT-5 (@CNES 2011, DISTRIBUTION ASTRIUM GEOINFORMATION SERVICES)	53
FIGURE 39: CARTE D'OCCUPATION DU SOL GENEREE A PARTIR DE LA CLASSIFICATION SUPERVISEE DE L'IMAGE SPOT-5 DU 24/09/2011.....	54
FIGURE 40: EXTRAIT DU SIG POUR LE VILLAGE DE GONI.	56
FIGURE 41: RESULTATS DE LA PREDICTION DES COLLECTIONS D'EAU (AIRES EN BLEU, ETAPE 1).....	58
FIGURE 42: SOMME DES PREDICTIONS DES DENSITES LARVAIRES D'ANOPHELES POUR LA PERIODE DU 31 MAI AU 24 JUILLET 2012	61
FIGURE 43 : REPRESENTATION DES 20 BACS UTILISES POUR L'EXPERIMENTATION DESTINEE A TROUVER LE DOSAGE LETAL DE BTI (A GAUCHE), MISE EN PLACE DU TERRAIN D'EXPERIMENTATION (A DROITE)	65
FIGURE 44 : DYNAMIQUE DES POPULATIONS DES LARVES (STADE 1+2=EARLY ; STADE 3+4=LATE ; PUPAE=NYPHES) DANS L'EXPERIMENTATION SEMI-TERRAIN. AUX JOURS MARQUES AVEC UNE FLECHE (JOUR 0, 7, 14 ET 21) DIFFERENTES CONCENTRATIONS DE WDG (WATER DISPERSIBLE GRANULE) DE BTI ONT ETE TESTEES. LE DIAGRAMME MONTRE LE PREMIER MOIS D'APPLICATION ENTRE LE 8 OCTOBRE ET LE 5 NOVEMBRE 2012. LES	

FLECHES INDIQUENT UN TRAITEMENT BTI. LES BARRES HORIZONTALES BLEUES MONTRENT UNE REDUCTION SIGNIFICATIVE AVEC $\alpha=0,05$ ET $\alpha=0,10$ DANS DES TESTS DE RANG KRUSKAL WALLIS ONE WAY ANOVA. 66

FIGURE 45 : EXEMPLE D'UNE CARTE DE RISQUE POUR LE VILLAGE DE TISSI (A GAUCHE). EN ROUGE LES COLLECTIONS D'EAU PREDITES PAR LE MODELE COMME ETANT MOINS PRODUCTIVES, EN VERT LES GITES LES PLUS PRODUCTIFS QUI ONT ETES TRAITES. DATES DE TRAITEMENT AVEC BTI DANS LES 5 VILLAGES QUI RECEVAIENT L'INTERVENTION (A DROITE) 69

FIGURE 46 : CAPTURES DE MOUSTIQUES ANOPHELES SPP. FEMELLES POUR LA PERIODE D'OBSERVATION. INDIQUE AVEC DES BARRES NOIRES VERTICALES LA PERIODE D'INTERVENTION BTI. 71

INTRODUCTION

Ce rapport final présente les actions et résultats principaux du projet **Paluclim**. Après un rappel des objectifs et du calendrier des travaux, les tâches réalisées sont présentées.

1. RAPPEL DES OBJECTIFS, DES ACTIONS A MENER ET DU CALENDRIER DES TRAVAUX

1.1. OBJECTIFS DU PROJET PALUCLIM

Le projet Paluclim a appliqué l'approche conceptuelle de Télé-épidémiologie reliant climat, environnement et santé publique (CNES, 2008), au paludisme rural dans la région sahélienne de Nouna au Burkina Faso. Le projet était d'étudier l'impact de la variabilité du climat sur le risque vectoriel, première étape biologique du risque de paludisme, et d'en analyser les conséquences sur les prévisions du risque entomologique.

Les objectifs ont été les suivants :

- Produire et valider des cartes de risque entomologique et des cartes dynamiques des risques d'exposition de la population des villages ruraux aux piqûres des anophèles, vecteurs du paludisme
- 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 guidées par les cartes produites comme adaptation aux risques paludiques

Un partenariat multidisciplinaire a été construit pour réaliser ce projet innovant. Il comprenait :

- Le Centre national d'études spatiales
- L'Institut de santé publique de l'université d'Heidelberg
- Le Centre de recherche en santé de Nouna
- Météo-France

Ce projet comprenait six tâches détaillées ci-après.

Tâche 1 : coordination du projet

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

Il a organisé les réunions, téléconférences, ateliers thématiques, et échanges de courriers inhérents au projet :

- un kick-off meeting à Heidelberg, du 24 au 26 mai 2011 à Heidelberg en Allemagne
- deux réunions d'avancement à Toulouse, France les 5 et 6 avril 2012 et les 6 et 7 février 2014
- réunions d'avancement spécifique sur la tâche 4 avec Météo-France les 26 septembre et 3 décembre 2012
- la réunion finale de restitution le 21 mai 2014 à Paris, France
- cinq téléconférences : 23 juin 2011, 13 avril 2012, 22 janvier 2013, 18 septembre 2013, 24 mars 2014

Il a assuré aussi la collecte des informations nécessaires à la rédaction des rapports intermédiaire et final.

De plus, un comité scientifique a été mis en place. Il a eu 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 était composé comme suit :

Rainer Sauerborn (Université d'Heidelberg) en tant que Président

Cécile Vignolles (CNES),

Norbert Becker (Université d'Heidelberg),

Yves M. Tourre (LDEO of Columbia University),

Ali Sié (CRSN),

Christophe Rogier (Institut Pasteur de Madagascar)

Vanessa Machault (Laboratoire d'Aérodologie de l'Observatoire de Midi-Pyrénées)

Tâche 2 : Collecte et traitement des mesures in-situ

1. Données entomologiques

Les campagnes de mesures entomologiques ont eu 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 ont été capturés en utilisant les trois méthodes décrites ci-dessous. Les captures ont été réalisées pendant les saisons des pluies 2011 et 2012.

- **Capture par pièges lumineux**

Des pièges lumineux du *Center for Disease Control* (CDC) (Model 512, John W. Hock Company, Gainesville, Floride) avec ampoules incandescentes ont été 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 était suspendu au-dessus du sol, près du lit des participants mais en dehors des moustiquaires si celles-ci sont utilisées. Les participants sont encouragés à maintenir leurs moyens quotidiens habituels de lutte contre les moustiques. Des techniciens du Centre de Recherche en Santé Nouna (CRSN), expérimentés en entomologie, sont venus dans chaque habitation (vers 18h) pour installer le piège lumineux et pour le brancher. À minuit approximativement, les techniciens changeaient la batterie. Le matin suivant (vers 6h), ils récupéraient le piège et les moustiques capturés. Les sacs de collecte étaient alors transportés au CRSN où les moustiques étaient stockés dans les récipients adéquats étiquetés. La date et l'heure de début et de fin de capture ont été enregistrées. Les moustiques capturés ont été comptés et l'espèce est identifiée par examen morphologique.

- **Collecte de la faune matinale résiduelle de moustiques après pulvérisation de pyréthriinoïdes**

La collecte de la faune matinale résiduelle **après** pulvérisation de pyréthriinoïdes a été 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 étaient fixés sur les planchers et un insecticide localement disponible était appliqué aux murs, aux meubles et au toit approximativement une minute après la fermeture des portes et des fenêtres. Après 15 minutes, les techniciens retournaient dans la pièce pour récupérer les draps avec les moustiques qui y étaient tombés. Les moustiques étaient alors stockés dans des récipients adéquats datés et transportés au laboratoire du CRSN. La date et l'heure de début et de fin de capture ont été enregistrées. Les moustiques capturés ont été comptés et identifiés.

Les résultats de ces captures a permis de mesurer la densité d'anophèles se reposant dans les maisons (comportement endophile) selon les villages, c'est-à-dire le nombre d'anophèles en contact avec la population humaine par unité de temps (en général, par nuit).

- **Captures sur appâts humains**

En 2012, les captures par pièges lumineux ont été remplacées par des captures sur appât humain (ou capture sur homme), aux mêmes emplacements dans les villages. Des techniciens du Centre de Recherche en Santé Nouna (CRSN), expérimentés en entomologie, sont venus dans chaque habitation pour collecter les moustiques adultes se posant sur leurs jambes entre 18h et 6h du matin. Les sacs de collecte (identifiés par heure de collecte) étaient alors transportés au CRSN où les moustiques étaient stockés dans les récipients adéquats étiquetés. La date et l'heure de début et de fin de capture ont été enregistrées. Les moustiques capturés ont été comptés et l'espèce est identifiée par examen morphologique.

Des collectes de larves d'anophèles ont aussi été menées.

- **Collecte des larves / paramètres hydrauliques**

Les zones d'études ont été choisies dans les villages pour être prospectées de façon exhaustive. Leur taille était d'environ 200m x 200 m. Les différents types d'habitats nécessitent différentes techniques de

capture des larves. Pour les étendues d'eau bien identifiables, on a procédé à des échantillonnages ponctuels alors que les agrégations non homogènes des micro-habitats demandent la construction d'une zone caractéristique. Cette nouvelle idée repose sur la construction d'une zone globale contenant plusieurs micro-gîtes. La surface en eau dans cette zone est définie et le nombre relatif des larves pour chaque micro-habitat est déterminé. Les zones d'études ont été visitées plusieurs fois pour connaître la dynamique temporelle de chaque type de gîte. Cela a permis de calculer une densité moyenne de larves par village dans la période de l'observation. Les paramètres à mesurer étaient 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, la végétation de surface, l'ombre, les prédateurs etc. La densité larvaire a été mesurée dans chaque collection d'eau avec une louche utilisée de façon standardisée (méthode dites du 'dipping'). Les grands habitats avec une répartition non homogène des larves demandent une collecte de larves en différents points. La turbidité a été mesurée avec un appareil dérivé du principe du disque-Secchi. Cela a permis de la mesurer aussi dans des eaux assez profondes. De plus, la présence de plantes, d'algues et de prédateurs a été relevée. Les autres paramètres comme la couleur, la pollution et l'ombre ont été inclus dans la description des habitats. Les données saisies pendant le travail de terrain ont permis l'attribution d'une prévalence caractéristique des larves aux paramètres environnementaux cartographiables par satellite.

2. Données climatiques

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

Tâche 3 : Production des cartes dynamiques de risque

La méthodologie qui a été utilisée repose sur l'approche conceptuelle développée par le CNES et ses partenaires (CNES, 2008 ; Tourre et al., 2009) qui consiste à analyser les relations "climat-environnement-santé" pour mettre en évidence les liens entre l'émergence et la propagation des maladies infectieuses (liées aux vecteurs, à l'eau et à l'air) et les changements climatiques et environnementaux en s'appuyant sur la technologie spatiale. Cette approche de recherche pluridisciplinaire appelée aussi télé-épidémiologie, couplant les sciences physiques et biologiques, permet en effet de définir les facteurs déterminants pour l'émergence et la diffusion de la maladie étudiée. Certaines épidémies (paludisme, fièvre de la vallée du Rift, dengue...) dépendent en effet de facteurs climatiques et/ou environnementaux dont certains peuvent être identifiés par télédétection. Les images satellites apportent donc des informations qui ne concernent pas directement les agents pathogènes (virus, bactéries, parasites) responsables de la maladie, mais leur environnement (données géographiques, météorologiques, hydrologiques...) et notamment les habitats favorables au développement et à la prolifération des vecteurs. L'apport de l'imagerie satellitaire a donc été de permettre la mesure des facteurs environnementaux favorables (ou non) à l'apparition de ces maladies. Cette approche comprend 3 étapes (cf. Figure 1) :

1. **Compréhension des mécanismes favorisant l'apparition et la propagation de la maladie :** constituer et analyser les jeux de données de terrain multidisciplinaires nécessaires afin d'identifier les paramètres physiques, biologiques et socio-économiques clés associés à la maladie étudiée
2. **Développement des produits spatiaux réellement adaptés :** identification du ou des capteurs spatiaux dont les performances (résolutions spatiale, temporelle, spectrale) sont en adéquation avec les paramètres clés identifiés précédemment et analyse des images issus de ces capteurs pour obtenir des produits spatiaux adaptés
3. **Elaboration des modèles :** ajustement de modèles prédictifs par combinaison des données in situ et des produits issus du spatial afin d'établir des cartes de risque environnemental innovantes intégrant des données spatiales et développer des systèmes d'information sur la santé, notamment des systèmes d'alerte précoce

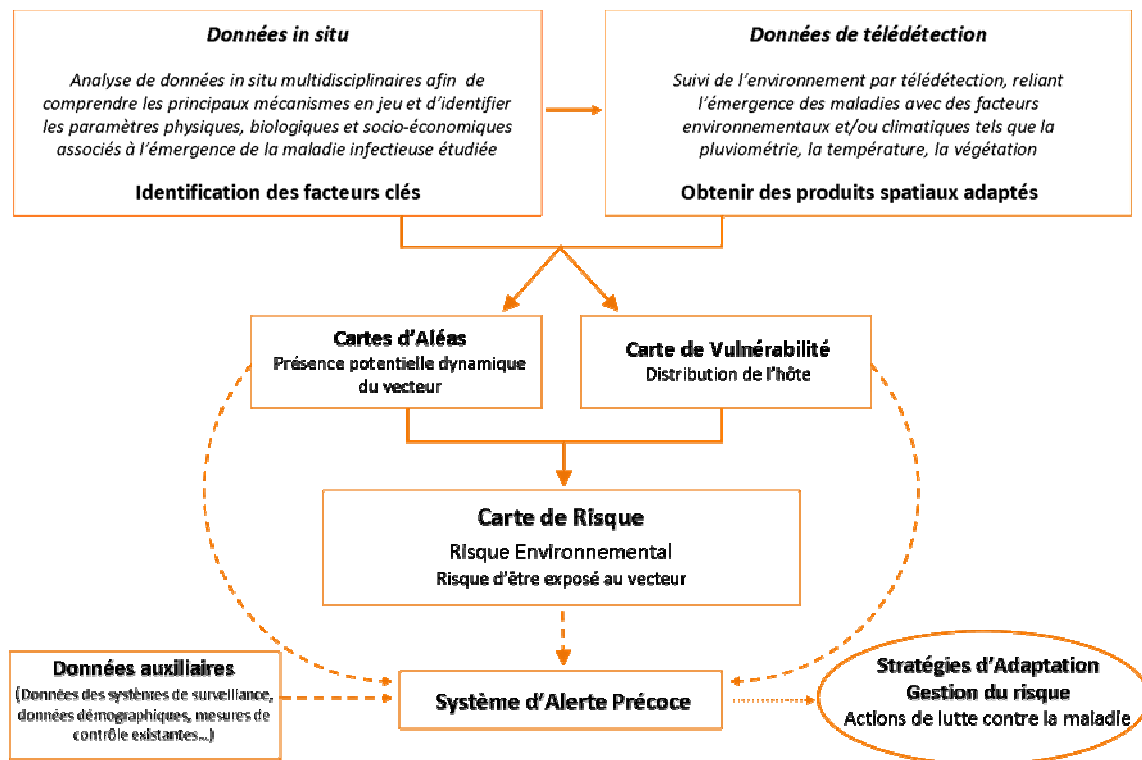


Figure 1 : Schéma de l'approche conceptuelle de télé-épidémiologie

En appliquant cette approche conceptuelle, l'objectif était donc dans ce projet d'identifier des facteurs environnementaux et météorologiques mesurables par satellite et/ou in situ, pouvant être utilisés pour l'évaluation du risque de paludisme en milieu rural dans le but d'élaborer des cartes du risque entomologique (larves et adultes) à visée opérationnelle (assistance à la lutte anti-larvaire et anti-adultes).

Le cycle de transmission du paludisme nécessite la présence de trois acteurs (cf. Figure 2) :

- le moustique femelle du genre *Anopheles*, vecteur potentiel de l'agent pathogène
- l'hôte humain, permanent ou occasionnel
- l'agent pathogène représenté par le parasite du genre *Plasmodium* sp.

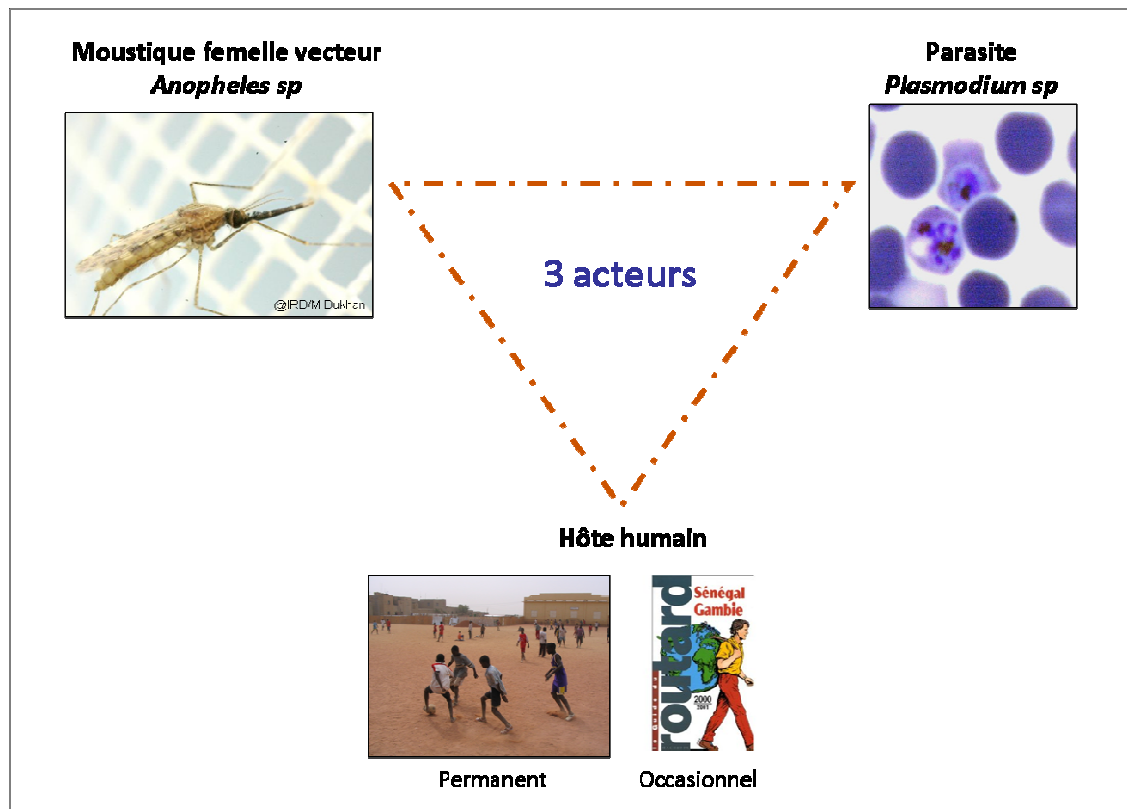


Figure 2 : Cycle de transmission du paludisme

La première condition nécessaire pour que des cas de paludisme surviennent est donc la présence des Anophèles. Or l'abondance de ces vecteurs est directement liée à la présence, la distribution et la persistance de collections d'eau de différentes tailles. Basé sur cette connaissance et sur des travaux menés sur le paludisme urbain à Dakar (Machault, 2010 ; Machault et al., 2011) et sur des études préliminaires réalisées par les partenaires du projet sur le paludisme rural au Burkina (Dambach et al, 2009 ; Dambach et al 2012), il a été décidé d'appliquer une méthodologie en trois étapes (cf. Figure 3) :

- Étape 1 : Cartographie des collections d'eau
- Étape 2 : Cartographie des gîtes larvaires - Analyse des paramètres environnementaux dans et autour des collections d'eau qui peuvent être reliés à la présence et l'abondance des larves
- Étape 3 : Cartographie des densités d'adultes - Identification des relations entre production larvaire, facteurs environnementaux et densité d'adultes

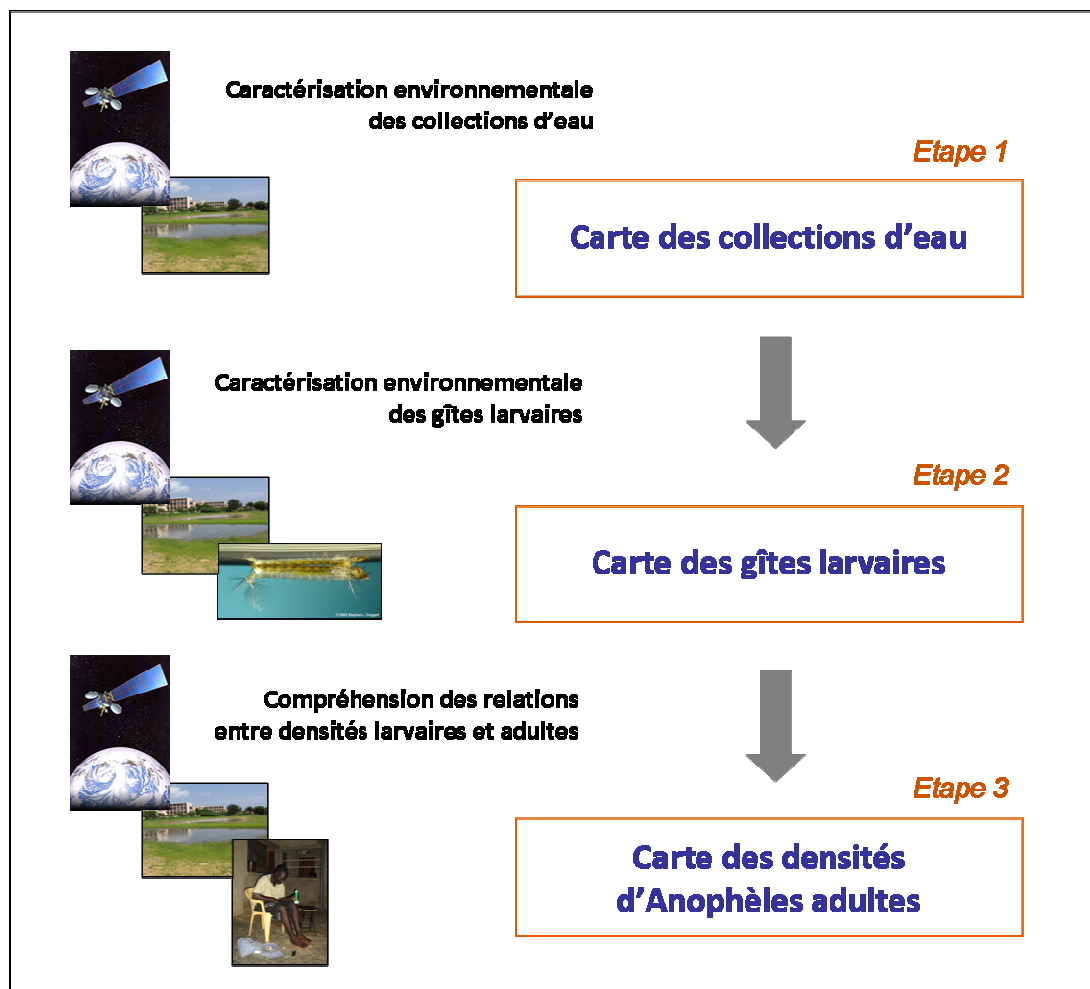


Figure 3 : Méthodologie de cartographie opérationnelle et dynamique

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 a été nécessaire. Jusqu'à présent, on s'était contenté de prévision saisonnière des pluies (qualitative ou non). Ce qui est important ici n'était pas l'événement pluvieux en lui-même mais plutôt la distribution des pluies au sein de la saison, pour comprendre la dynamique des gîtes larvaires et l'abondance des vecteurs dans les villages voisins, mais avec des écosystèmes différents.

Cette tâche 4 a visé également à analyser les trois échelles de temps (saison, interannuel, changement climatique), à l'aide de données historiques, de prévisions saisonnières et de simulations du climat futur. Les scénarios en climat futur sont issus de l'exercice CMIP-5, au travers d'une approche multi-modèle.

Ce travail a été suivi conjointement par le CNRM et la Direction de la Climatologie pour bénéficier de tout l'environnement de production de Météo-France (expertise, documentation, supervision, etc.).

1. Analyse des données

Le travail a d'abord consisté à analyser la variabilité spatiale et temporelle du climat dans la zone d'étude, à l'aide du réseau de mesures historique, des données des campagnes de mesure et de données satellitaires d'estimation des précipitations.

2. Echelle mensuelle et saisonnière, modulation par les basses fréquences

L'utilisation d'un modèle d'impact a permis de mesurer l'importance de la modulation du risque palustre par les variations interannuelles du climat.

L'utilisation du modèle ARPEGE de prévision saisonnière pour anticiper le risque a été testée et comparée à des méthodes simples combinant connaissance climatologique et variabilité basse fréquence du climat. En effet, la contribution des oscillations basses fréquences sur la variabilité pluviométrique naturelle quasi-biennale, interannuelle et basses fréquences (type AMO) ont fait 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, suivant le modèle de Jarlan et al. (2005) n'a pu être développée pour des questions de temps.

3. Echelle régionale du changement climatique

Le changement climatique a été évalué à partir de plusieurs modèles climatiques, selon 2 scénarios de l'exercice CMIP-5. Une descente d'échelle statistique simple (quantile/quantile) a été employée pour ajuster les projections à la zone d'étude. L'impact de l'évolution du climat sur le risque palustre a pu ainsi être évalué, ainsi que les incertitudes liées à la modélisation, aux scénarios socio-économiques et aux modulations par la variabilité naturelle du climat.

Tâche 5 : Stratégie d'adaptation au risque paludique

Un des buts de ce projet était de favoriser le développement de stratégies de santé publique et environnementales locales d'adaptation utilisant les cartes de risque anophélien ou de production larvaire pour focaliser la lutte antivectorielle et maximiser son ratio coût-efficacité. Globalement, le paludisme est un problème majeur de santé publique ; 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.

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 dues au paludisme. Deuxièmement, la modélisation contribue à une meilleure compréhension de la transmission de paludisme et des facteurs environnementaux et météorologiques importants, en particulier à l'échelle locale (Yé, 2005). Troisièmement, cartographier permet d'identifier les zones à risque de paludisme et les facteurs de risque environnemental significatifs. Quatrièmement, des cartes de risque peuvent également être employées pour identifier des régions où l'éducation sanitaire est nécessaire pour réduire la création et la persistance de gîtes larvaires créés par l'activité humaine. Finalement, les cartes et modèles peuvent servir à évaluer les mesures environnementales locales destinées à réduire l'incidence du paludisme.

Plus spécifiquement, les cartes de risque de paludisme peuvent être utilisées pour guider des programmes de contrôle des vecteurs 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 est 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.

Au niveau du contrôle des stades larvaires d'anophèles, d'excellents résultats ont été obtenus en appliquant les agents microbiens de contrôle basés sur le *Bacille israelensis* de *thuringiensis* (Bti) et *Bacille sphaericus* (Bsph) en Europe, Australie, Amérique sans nuire à l'environnement (Becker et al., 2003). L'efficacité contre les larves de moustiques et l'innocuité 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). Leur impact sur les infections plasmodiales et sur l'incidence du paludisme a cependant rarement été démontré expérimentalement, en particulier en milieu rural où les gîtes larvaires peuvent être très nombreux sans nécessairement être regroupés dans des zones particulières où la lutte pourrait être focalisée (contrairement aux gîtes larvaires en milieu urbain qui sont concentrés dans des zones spécifiques (Machault et al., 2012, Gadiaga et al., 2011)). Par ailleurs, le coût de mise en œuvre de cette stratégie et son ratio coût-efficacité sont des obstacles à sa généralisation. Leur application focalisée guidée par des cartes de risque de production larvaire pourrait permettre d'améliorer ce ratio. Dans ce projet, les experts locaux et internationaux ont mis 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 du vecteur.

1. Intervention de santé publique à court terme

Les cartes de risque développées au cours de ce projet visaient à reconnaître les zones à haut risque identifiées grâce à la prédiction de la distribution et de la productivité des gîtes larvaires d'anophèles dans les villages étudiés en se basant sur des paramètres environnementaux issus de l'analyse d'images satellitaires. Il s'agissait 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, en se concentrant uniquement sur les zones qui ont été identifiées comme zones à haut risque entomologique. Cette intervention a été réalisée sur 10 villages de la région de Nouna, 5 étant les unités d'intervention et 5 étant les unités de contrôle.

- Etape 1. Préparation des interventions larvicides

La première année une étude préparatoire a été effectuée 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 a été recruté et formé, les images satellitaires ont été traitées et utilisées pour générer des cartes opérationnelles locales (selon les modalités de modélisation mises en évidence à la tâche 3) afin qu'elles soient 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 a traité tous les points d'eau dans les zones d'intervention.

- Etape 2. Evaluation entomologique

Les densités de moustiques adultes capturés à intervalle régulier par piège lumineux ou sur appâts humains, et ceux collectés après pulvérisation de pyréthrinoides ont été comparées entre les zones d'intervention et les zones contrôle.

- Etape 3. Analyse statistique

Une analyse statistique a été effectuée suivant le test statistique Cochran-Mantel-Haenszel sur les rangs ($\alpha=0.05$) pour comparer le nombre de moustiques capturés entre les villages traités et non-traités

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

Des prévisions de risque de paludisme 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 était donc d'utiliser la télédétection pour prévoir les zones de distribution du paludisme et de contribuer au contrôle du paludisme en ajoutant une approche larvicide focalisée et guidée par des cartes de risque 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 action de valorisation :

- par la diffusion de l'information auprès des utilisateurs locaux à savoir les acteurs de la santé publique qui mettent en place les politiques de gestion de la santé publique,
- par le biais de publications,
- par l'organisation de colloques et/ou de journées thématiques,
- en mettant à disposition de la communauté 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.eu/>),
- 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 de la maladie,

localisation géographique, utilisation des techniques spatiale, enjeux climatique 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 autre document que les membres du projet souhaitent partager.

Sous la responsabilité du CNES, ces différentes actions de valorisation se font en collaboration avec les différents acteurs de ce projet.

1.2. RESULTATS ATTENDUS

Le premier résultat attendu était **la production et la validation de cartes de risque entomologique**. Il s'agit d'une part du risque potentiel de présence de gîtes larvaires dans et autour des villages et d'autre part du risque de présence potentielle d'anophèles adultes.

Les informations contenues dans ces cartes pourront alors permettre d'adapter les politiques de gestion du risque. Cette adaptation devrait alors déboucher dans une seconde phase, à **une seconde série de résultats** :

- Intervention de santé à court terme : dans le cadre de la mise en place d'une stratégie de lutte par contrôle des vecteurs, ajouter aux mesures de contrôle actuelles, une approche larvicide par agents microbiens focalisée et guidée par des cartes de risque, et montrer que sa mise en œuvre dans ce type de zone rurale est possible
- Intervention de santé à long terme :
 - o prévisions de risque de paludisme à moyen et long terme en intégrant notamment les résultats de l'étude de l'impact de la variabilité du climat sur le risque environnemental
 - o diffusion de ces informations auprès des acteurs de Santé publique
 - o aide à l'interprétation des résultats et à leur utilisation dans la planification des interventions

1.3. CALENDRIER DES TRAVAUX

Le projet s'est déroulé sur 36 mois à partir de la date de notification de la subvention (11/03/2011). Il se décomposait en six tâches (T1 à T6) rappelées dans la Figure 4.

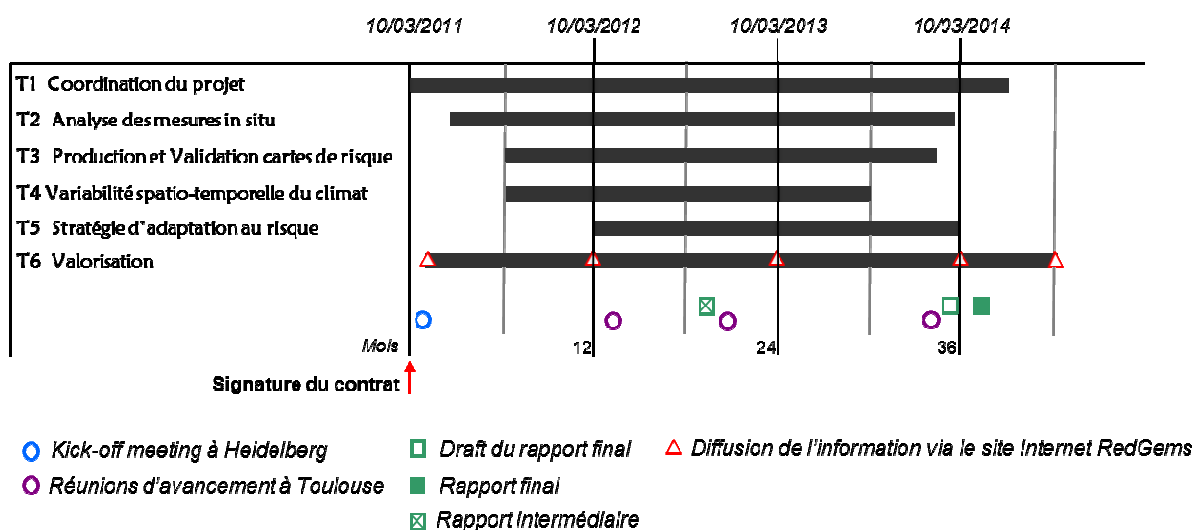


Figure 4 : Calendrier du projet

2. DONNEES EXISTANTES

2.1. ZONE D'ETUDE

La zone d'étude de Nouna est située au Nord-Ouest du Burkina Faso à la frontière du Mali (Figure 5). 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. 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.

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.

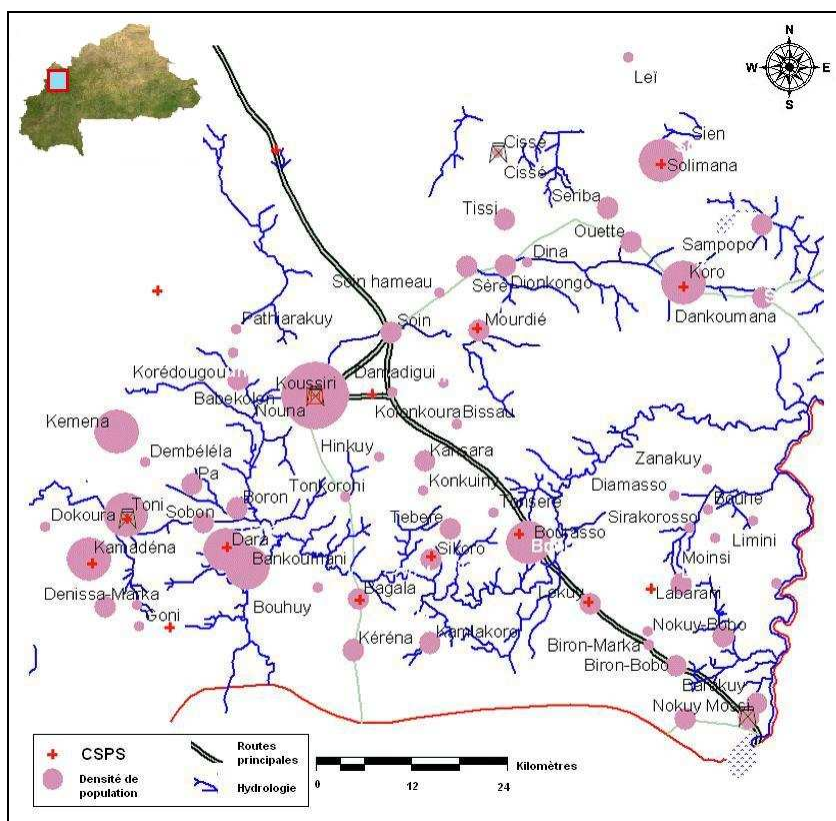


Figure 5 : Localisation de la zone d'étude (carré rouge)

2.2. LES DONNEES HISTORIQUES

2.2.1. Entomologie

En 2009 une collecte de moustiques adultes a été réalisée dans 12 villages de la région de Nouna en utilisant des pièges lumineux. La capture de moustiques adultes a été effectuée pendant la saison des pluies à des jours différents dans un cycle de visites de deux villages par jour. Chaque village a été revisité tous les six jours, entre le 2 septembre et le 23 octobre 2009. Dans chaque village, 6 pièges lumineux étaient installés (trois points de capture dans chaque village avec un poste intérieur et deux postes extérieur). Les valeurs moyennes pour tous les villages ont été calculées en divisant le nombre cumulé de moustiques par village par le nombre de captures

Les résultats de la campagne de mesures sont présentés dans la Figure 6 et le Tableau 1. Le nombre de moustiques capturés diffère grandement entre espèces et entre villages. On observe que quel que soit le village, *A. gambiae s.l.* est le moustique majoritaire puisqu'il représente près de 63% des moustiques capturés (cf. Tableau 1). Alors que le nombre de *A. gambiae s.l.* montre des différences notables entre les villages, le nombre de *Culex* reste constant entre 100 et 150. Le nombre de *A. gambiae s.l.* varie de 160 à 373 entre Bourasso et Boron. Il est à noter que *A. funestus*, autre vecteur potentiel du paludisme ne joue pratiquement aucun rôle avec un total de 61 moustiques sur les 23939 moustiques capturés. Enfin, on peut remarquer la très faible présence des autres espèces de moustiques (*Aedes*, *Mansonia* et autres) qui représentent moins de 5% de l'ensemble des moustiques capturés. Il est à noter que ces moustiques comme ceux du genre *Culex* ne sont pas vecteurs du paludisme.

Tableau 1 : Espèces des moustiques dans la région d'étude. Captures dans des pièges lumineux dans 12 villages entre le 2 Septembre et le 23 Octobre 2009 d'un total des moustiques de 23.939

	<i>A. gambiae s.l.</i>		<i>A. funestus</i>		<i>Culex sp.</i>		<i>Aedes sp.</i>		<i>Mansonia sp.</i>		Autres
Total	14988		61		8206		280		165		239
Pourcentage	62.6		0.2		34.3		1.2		0.7		1
Genre	femal	male	femal	mal	femal	male	femal	mal	femal	mal	-
Total	13.31	1.67	54	7	6.022	2.18	254	26	154	11	-
Pourcentage	89	11	89	11	73	27	91	9	93	7	-

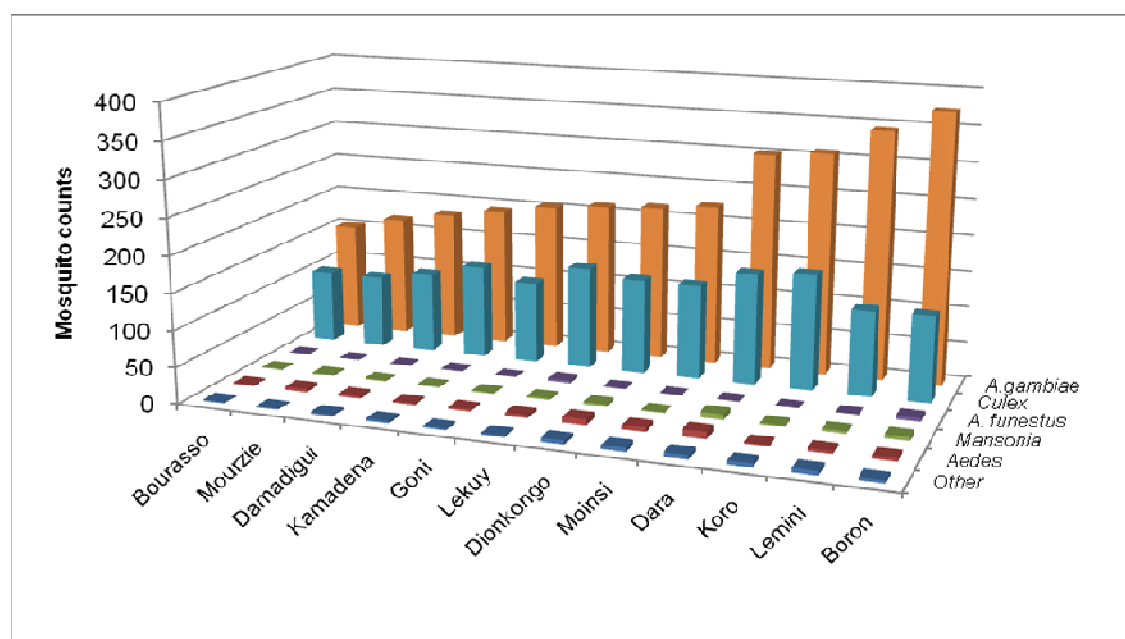


Figure 6 : Nombre et espèce de moustiques adultes capturés par pièges lumineux entre le 2 septembre et le 23 octobre 2009

2.2.2. Météorologie

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.

2.3. DONNEES ET PRODUITS ISSUS DU SPATIAL

Plusieurs types de données ou produits étaient disponibles :

Tout d'abord, il existait un premier jeu d'images satellite SPOT-5 acquises entre 2008 et 2009 grâce au programme ISIS du CNES (<http://www.isis-cnes.fr/>). Chaque image couvre approximativement une superficie de ~3600km² (~60km x 60km) et est centrée sur la ville de Nouna (12°44'N; 3°51'W) comme le montre la Figure 7. Les dates d'acquisition étaient les suivantes :

- 9 septembre 2008 (saison des pluies)
- 12 octobre 2009 (début de la fin de la saison des pluies)
- 7 novembre 2009 (fin de la saison des pluies)

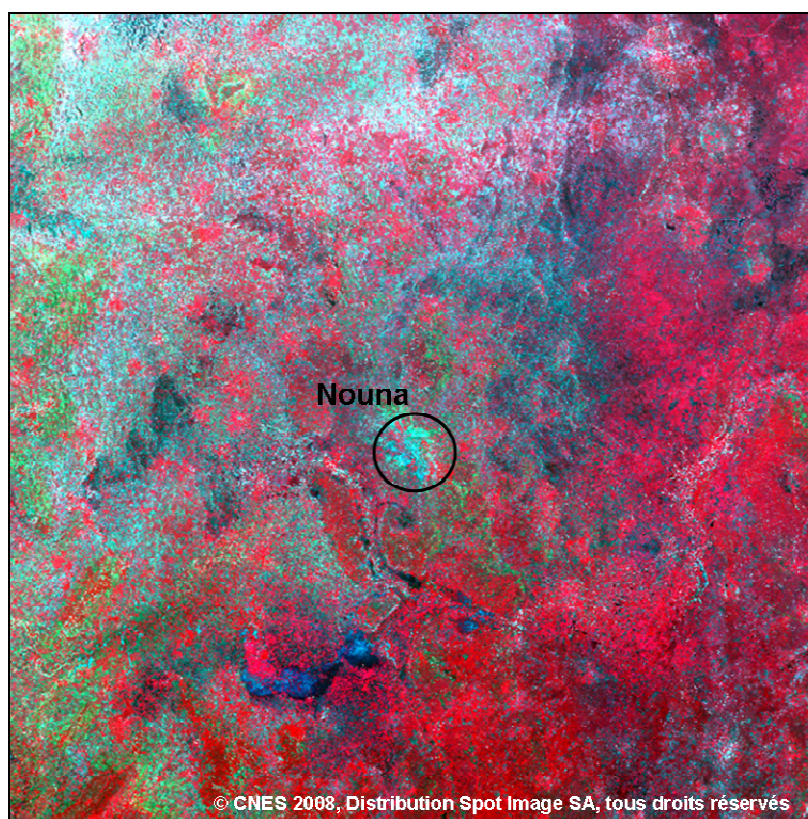


Figure 7 : Image SPOT-5 du 9 septembre 2008

Deux types de données ont été obtenus :

- Image HR

Il s'agit d'image multispectrale avec une haute résolution spatiale (HR) à 10m comportant 4 bandes spectrales centrées sur les longueurs d'ondes du vert (XS1), du rouge (XS2), du proche infrarouge (XS3) et de moyen infrarouge (XS4).

- Image THR

Il s'agit d'image multispectrale avec une très haute résolution spatiale (THR) à 2.5m comportant 3 bandes spectrales centrées sur les longueurs d'ondes du vert (XS1), du rouge (XS2), du proche infrarouge (XS3).

Les images ont été livrées après avoir subi une série de prétraitements afin de corriger radiométriquement et géométriquement les données (niveau de prétraitement 3 appelé aussi Ortho). Les corrections géométriques, appelées "orthorectifications", se basent sur un modèle de ré-échantillonnage qui tient compte des distorsions dues aux conditions de prise de vue (éphémérides, attitude, etc.) ainsi que des transformations nécessaires pour transposer l'image dans la projection cartographique requise. Dans notre cas, elles ont été livrées dans la projection UTM/WGS84 (pour plus d'infos sur les niveaux de prétraitement consulter : <http://www.astrium-geo.com/fr/911-niveaux-de-pretraitement-et-precision-de-localisation>).

Ces images ont été utilisées pour obtenir différentes variables environnementales telles que la présence de végétation ou de zones urbanisées en se basant sur le calcul d'indices de télédétection tel que le NDVI et sur la cartographie de l'occupation du sol obtenue par analyse de ces images. Des exemples d'indices sont présentés dans le tableau 2.

Tableau 2: Exemples d'indices de télédétection utilisés pour l'étude

Indice	Calculation
NDVI (Rouse et al., 1973) Normalized Difference Vegetation Index	$\frac{NIR - red}{NIR + red}$
SAVI (Huete, 1988) Soil Adjusted Vegetation Index	$\frac{NIR - red}{NIR + red} * (1 + L)$
NDPI (Lacaux et al., 2007) Normalized Difference Pond Index	$\frac{SWIR - green}{SWIR + green}$
NDWI Gao (Gao., 1996) Normalized Difference Water Index Gao	$\frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR}$
NDWI McFeeters (McFeeters, 1996) Normalized Difference Water Index McFeeters	$\frac{green - NIR}{green + NIR}$
MNDWI (Xu, 2006) Modified NDWI McFeeters	$\frac{green - SWIR}{green + SWIR}$
NDTI (Lacaux et al., 2007) Normalized Difference Turbidity Index	$\frac{red - green}{red + green}$

La carte d'occupation du sol a été obtenue par classification supervisée (méthode du maximum de vraisemblance).

Des images MODIS (Moderate Imaging Spectroradiometer) ont aussi été acquises. Elles permettent d'accéder à la température de surface de jour comme de nuit. Des synthèses hebdomadaires ont été extraites à 1km de résolution spatiale au cours de la saison des pluies 2009.

D'autre part, les données de pluies issues de la mission TRMM (Tropical Rainfall Measurement Mission) ont aussi été acquises en 2009. Elles permettent d'accéder à des données journalières à 25km de résolution spatiale. Elles sont téléchargeables gratuitement à partir du site http://disc2.nascom.nasa.gov/Giovanni/tovas/TRMM_V6.3B42_daily.2.shtml

Enfin un modèle numérique d'élévation (MNE) à 90m de résolution a été obtenu à partir de la mission SRTM (Shuttle Radar Topography Mission). Il a été ré-échantillonné à 10m de résolution.

3. CAMPAGNE DE MESURES 2011

3.1. ENTOMOLOGIE

3.1.1. Zone d'étude, relevé de terrain et période d'étude

L'investigation de terrain a porté sur 30 zones sélectionnées dans les 10 villages dans la zone d'étude et du district sanitaire de la région (cf. Figure 8). Le choix de ces zones s'est basé sur l'étude et le traitement d'une image satellite SPOT-5 à 2,5m de résolution spatiale, acquise le 12/10/2009.

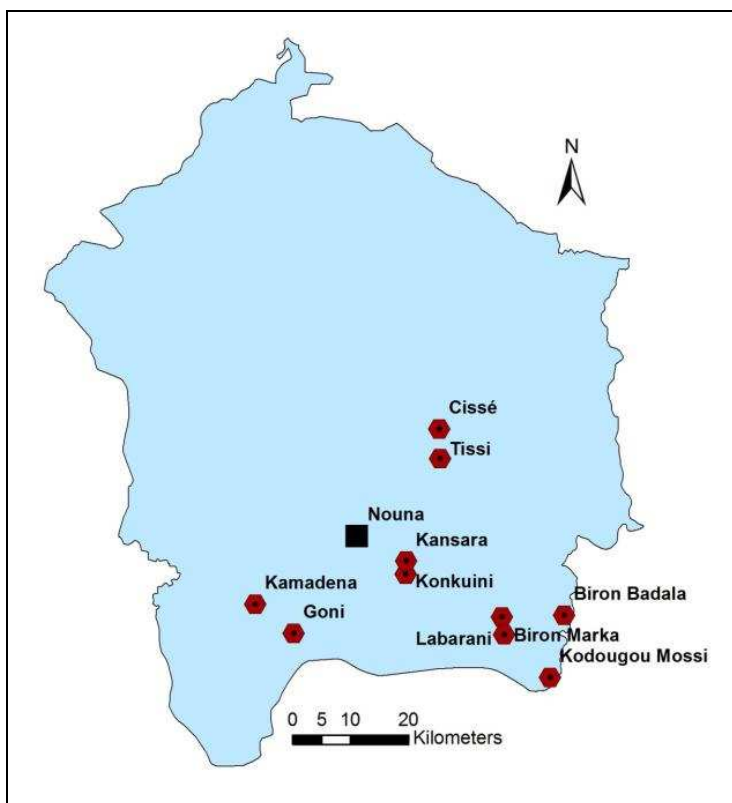


Figure 8 : Représentation des 10 villages de l'étude répartis dans le district sanitaire de Nouna

Trois zones ont été choisies au sein de chaque village. Une des 3 zones se situe dans le village même et couvre une zone d'environ 200m x 200m. Les 2 autres zones se situent en bordure du village et couvrent un rayon d'environ 100 à 200m côté village et d'environ 500m à 1km côté extérieur (cf. Figure 9).

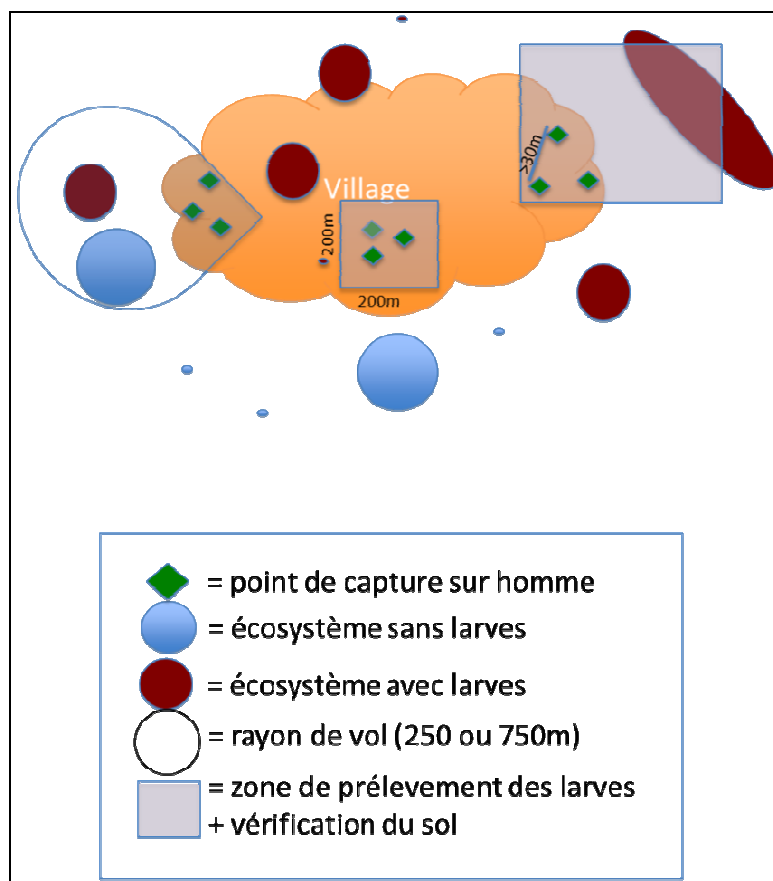


Figure 9 : Zones d'investigation pour les mesures entomologiques

Lors du premier passage sur le terrain, les zones sélectionnées grâce aux images ont pu être légèrement adaptées selon les conditions réelles (ex. zones inaccessibles aux équipes, difficulté à trouver les endroits pour les prélèvements).

Une fois les zones définitivement choisies, une cartographie précise en est faite en relevant suffisamment de points GPS sur son pourtour ou en effectuant une trace GPS. Pendant toute la durée de l'étude, aucune modification du contour des zones n'a été faite afin d'assurer la comparabilité des données.

Le nom, la description de la zone et les numéros des points GPS et des photos ont été consignés dans une fiche de saisie « ZONES D'ETUDE » (cf. Annexe 1). Une seule fiche est créée par zone.

La campagne de mesures in situ s'est déroulée entre fin février et fin septembre 2011.

3.1.2. Collections d'eau et gîtes larvaires

Lors du passage dans une zone d'étude, la totalité de sa surface a été parcourue par les équipes de terrain. Toutes les surfaces publiques et, dans la mesure du possible, les surfaces privées (cours) ont été visitées.».

Collections d'eau

Pour toute collection d'eau présente dans les zones d'études, les informations suivantes ont été relevées dans les fiches « COLLECTIONS D'EAU » (cf. Annexe 2). Chaque fiche correspond à une collection d'eau pour une date donnée):

- Paramètres de cartographie (nécessaires pour pouvoir retracer la collection sur une carte) :
 - o Points GPS en quantité suffisante ou trace GPS (selon la taille et la forme).
 - o Dimensions : pour les petites collections, les dimensions sont évaluées en nombre de pas ou avec un centimètre ruban; pour les grandes collections, les dimensions sont estimées visuellement puis mises à jour grâce aux relevés GPS.
- Paramètres généraux :
 - o Nom de la zone d'étude.

- o Date et horaire de la prospection.
 - o Numéro de la collection. Ce numéro est attribué lors de la première prospection et il est impérativement conservé pour la totalité des prospections pour les 2 périodes d'étude.
 - o Type de collection (flaque, zone marécageuse, puits, fondation de maison...).
 - o Profondeur : pour les collections peu profondes, un mètre est utilisé ; pour les collections profondes, la profondeur est soit estimée visuellement, soit estimée en interrogeant les personnes alentours (ex. propriétaire d'un puits), soit seulement indiquée comme « profond ».
 - o Type de sol : évaluation visuelle du type de sol (boue, terre, sable, goudron, graviers).
 - o Odeur et couleur de l'eau.
 - o Température, pH, conductivité, mesurés par pH-mètre.
 - o Turbidité, mesurée grâce à une bouteille graduée (disque secchi) décrite dans la partie Matériel.
 - o Présence de végétation de surface et pourcentage de la collection couvert par la végétation.
 - o Pourcentage d'ombre, estimée visuellement pour un soleil au zénith. L'ombre portée par la végétation de surface haute (ex. herbe, roseaux) est prise en compte. La végétation de surface basse (ex. lentille, algue) n'est pas considérée comme apportant de l'ombre.
 - o Présence de faune (y compris de prédateurs), estimée visuellement.
- Photos : des photos de toutes les collections d'eau ont été prises lors de chaque prospection.



Figure 10 : Exemple d'une grande collection d'eau dans la région de Nouna

Dans la mesure du possible, les équipes de terrain ont été les mêmes pour toute la durée du projet, afin de garantir la comparabilité des paramètres estimés visuellement.

Lors du premier passage dans une collection d'eau, la fiche de saisie contenait une description détaillée de l'environnement proche et plusieurs photos des alentours sont prises.

Collections additionnelles : si plusieurs collections d'une même zone sont proches et se ressemblent, elles ont été enregistrées comme une seule collection. Les paramètres généraux sont relevés dans la collection principale mais les paramètres de cartographie ont été enregistrés pour la collection principale ainsi que pour toutes les collections additionnelles, en utilisant une fiche de saisie « COLLECTIONS ADDITIONNELLES » (cf. Annexe 2).

En cas de forte pluie, le ruissellement empêche la cartographie des collections d'eau. Les collections permanentes ou déjà connues peuvent être investiguées mais il convient d'attendre la fin du ruissellement pour compléter les relevés.

Remarque : étant donné l'objectif de validation des modèles de prédiction spatio-temporelle du risque de paludisme, la collecte précise des paramètres de cartographie était primordiale.

Prospections larvaires

Pour toute collection d'eau présente dans les zones d'études, les densités larvaires d'anophèles et de Culicinae ont été relevées. Dix louches (20 pour les très grands gîtes, ensuite divisé par deux) ont été prises sur les bords de chaque collection d'eau. Pour les grandes collections, ces louches ont été réparties sur le pourtour. Pour les petites collections, le nombre de louches pouvait être inférieur à 10. Dans tous les cas, le nombre de louches était reporté sur la fiche de saisie.

Le nombre de larves capturées dans les louches a été compté et enregistré pour les anophèles et les Culicinae pour chaque stade larvaire. Les nymphes ont été comptées puis conservées dans un pot pour les faire émerger au laboratoire, déterminer leur genre et mettre à jour la fiche de saisie.

Ces données larvaires relevées sur le terrain ont été consignées dans la fiche « COLLECTIONS D'EAU » (cf. Annexe 2).

3.1.3. Collecte de moustiques adultes

En 2011, des captures de moustiques adultes ont été réalisées en utilisant seulement des pièges lumineux (cf. paragraphe 1.1). Dans chacune des 3 zones de chacun des 10 villages de l'étude, 3 postes de capture ont été mis en place. Pour chacun de ces points de capture, des pièges ont été suspendus, un piège à l'extérieur de la maison et un piège à l'intérieur de la maison. Pour le poste intérieur, une fenêtre ou une porte est laissée entrouverte. Les 3 postes de capture étaient espacés d'environ 100m.

Analyses de laboratoire

Les sacs contenant les moustiques ont été amenés au laboratoire et traités le jour même.

Les moustiques ont été triés par genre. Les Anopheles ont été identifiés morphologiquement selon les clés de Gillies and Coetzee (1987). Les Culicinae ont été identifiés morphologiquement selon les clés d'Edwards (1941). Tous les anophèles ont été conservés individuellement à -20°C, dans des tubes identifiées par numéro unique de moustique et contenant du Silica gel.

Un cahier de capture a permis de consigner le nombre de Culicinae capturés par zone d'étude, par poste de capture (de 1 à 3), par date et heure. Pour les Anopheles, ce cahier comportait le numéro unique d'identification de chaque spécimen, ainsi que la zone d'étude, le numéro du poste de capture, la date, l'heure de capture et l'espèce.

3.1.4. Déroulement des collectes entomologiques

Pendant la période de forte abondance des moustiques, les captures d'adultes et de larves ont lieu toutes les 2 semaines dans chaque zone. Les équipes ont capturé tous les jours (à raison de 5 jours ouvrés par semaine), dans 3 zones simultanément. Au total 90 points de captures ont été mis en place (30 zones avec 3 points de captures avec des pièges lumineux dans chacune). Chaque point de capture était constitué d'un poste extérieur et d'un poste intérieur.

3.1.5. Principaux résultats et état d'avancement des analyses

Bilan suivi des collections d'eau

Au total 139 collections d'eau ont été suivies d'août à décembre 2011. La plupart des petites collections d'eau se sont taries avec la diminution de la pluviométrie à partir de fin septembre début octobre. Les grandes collections d'eau par contre ont persisté et sont restées productives jusqu'à la fin des prélèvements en décembre.

Bilan suivi des gîtes larvaires

Les collectes des larves ont été faites entre mi-août et mi-décembre 2011 dans les 10 villages de la zone d'étude. A chaque visite, coïncidant avec les captures des adultes, chaque collection d'eau identifiée a été prospectée afin d'une part d'établir si la collection d'eau était un gîte larvaire productif et d'autre part de déterminer sa densité larvaire (10 louches par gîte, 20 louches pour des grands marigots, ensuite

divisé par deux). Le nombre moyen des larves d'anophèles diminue après la saison pluvieuse (cf. Figure 11).

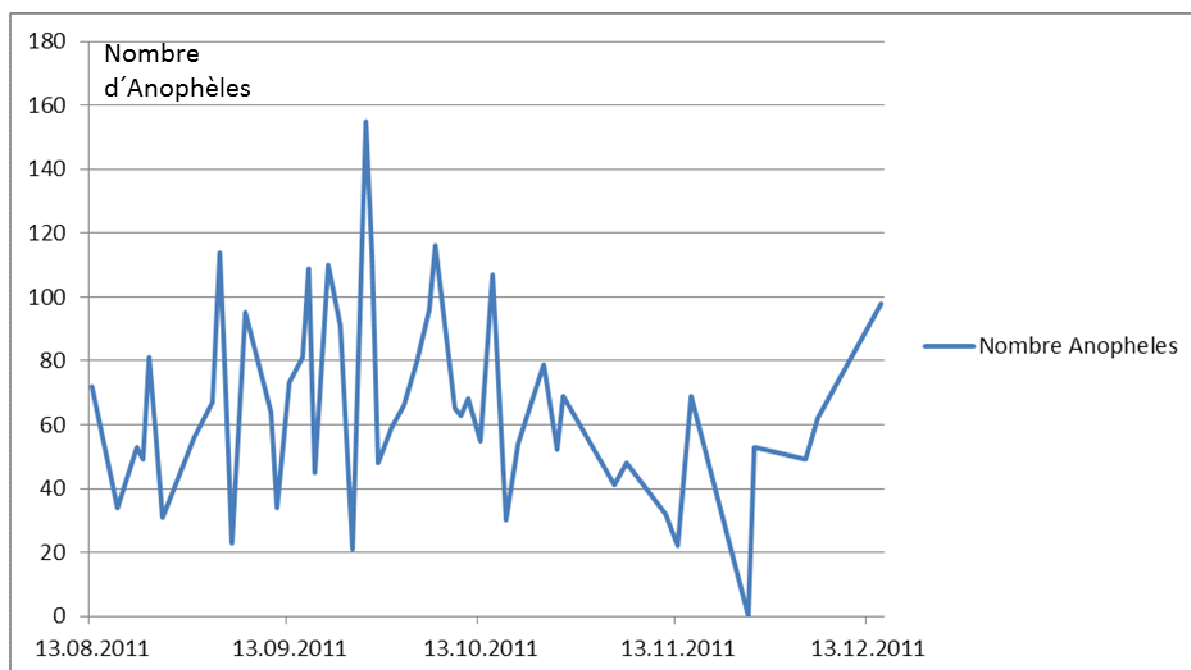


Figure 11 : Evolution du nombre de larves d'anophèles au cours de la saison des pluies 2011

La densité larvaire diffère d'un village à l'autre comme le montre la Figure 12.

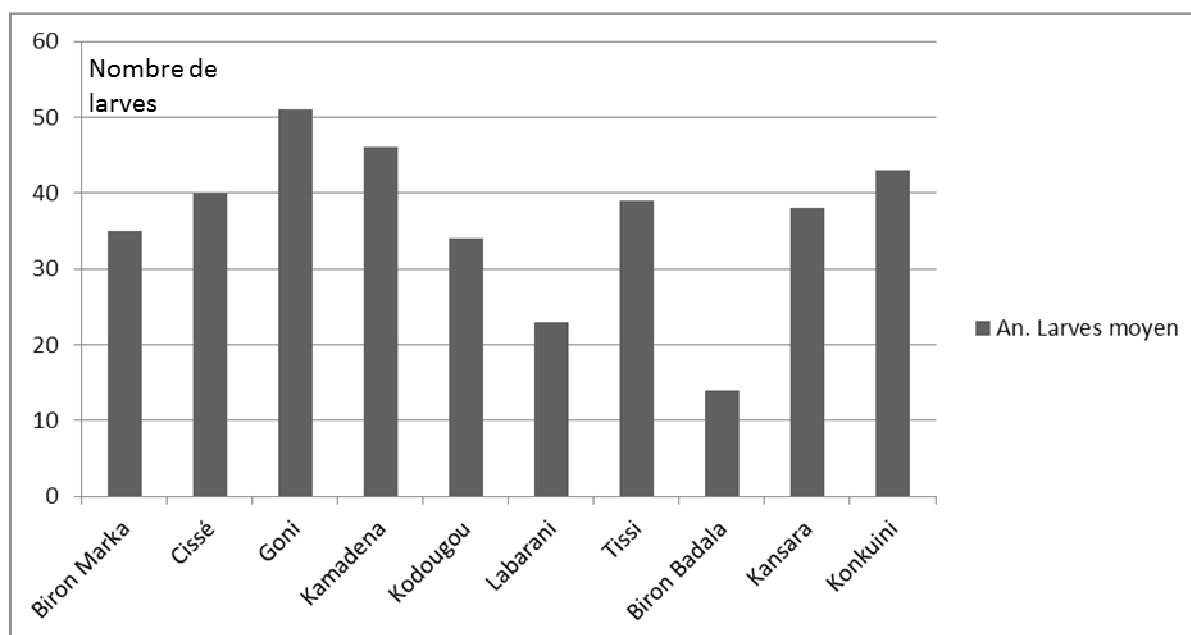


Figure 12 : Densité larvaire dans les 10 villages d'étude (moyenne par village)

Bilan captures des moustiques

La collecte des moustiques adultes en utilisant des pièges lumineux a commencé le 26 février 2011 et a fini le 27 septembre 2011. L'autorisation du comité éthique pour utiliser la capture sur homme étant arrivée trop tardivement dans la saison, elle n'a été utilisée qu'en 2012. La détermination des espèces de moustiques en laboratoire a ensuite été réalisée. Les moustiques ont été capturés selon le protocole dans les 10 villages. Il est à observer sur la figure 13 que les pics de densités des moustiques ont été relevés pour la plupart des villages vers fin septembre, à la fin de la saison pluvieuse. Tandis que les *Anopheles gambiae*, vecteur principal dans la région est abondant tôt dans l'année et que son

abondance augmente vite, les *Anopheles funestus* et *Anopheles nili* arrivent plus tard dans la saison à savoir à partir de juillet.

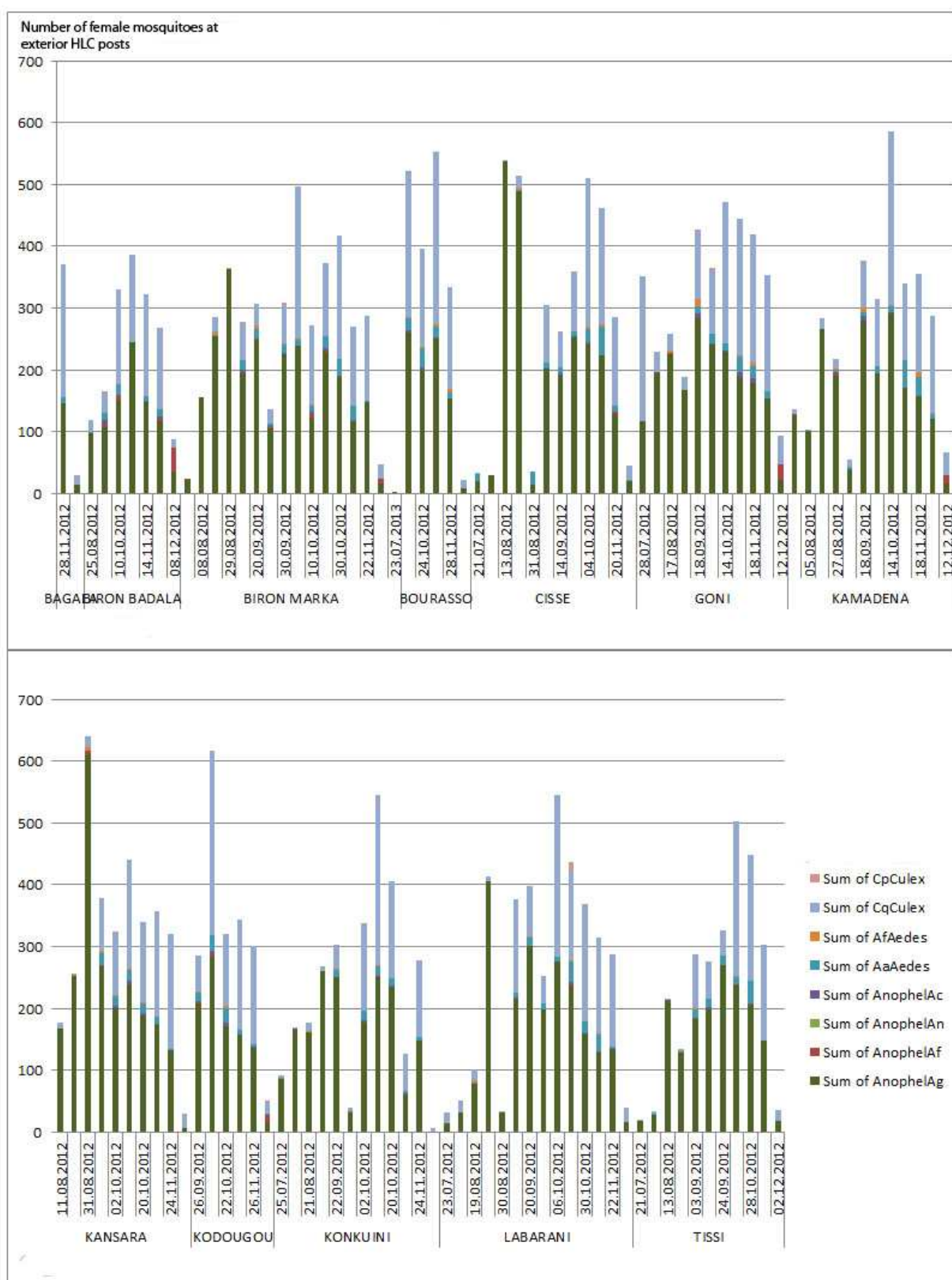


Figure 13 : distribution extérieure des différents genres de moustiques femelles par village et date entre le 26 février et le 27 septembre 2011 dans les 10 villages d'étude.

Comme montré dans la Figure 13, la répartition des espèces et leur nombre total par capture est hétérogène. On note aussi que l'apparition des *A. gambiae* s.l. vecteur du paludisme principal dans la région, se fait relativement tôt au cours de la saison des pluies. Les moustiques du genre *Culex*

apparaissent plus tard, suivis par les *A. funestus* et *A. nili*. Il faut remarquer aussi que globalement quel que soit le village, *A. gambiae* s.l. reste majoritaire face aux espèces de moustiques. On observe aussi une diminution des Anophèles spp au cours de la saison des pluies tandis que le nombre total de moustiques ne baisse pas. Ce phénomène pourrait peut-être s'expliquer par la compétition des différentes espèces entre elles, pas seulement parmi les adultes mais aussi dans les gîtes larvaires.

3.2. OCCUPATION DU SOL AUTOUR DES VILLAGES

Afin de réaliser une carte d'occupation du sol détaillée et fiable autour des villages par classification supervisée des images satellite, il a été nécessaire d'avoir une idée des différents types d'occupation du sol réellement présents sur le terrain. Cette méthode de cartographie automatique de l'occupation du sol requiert une connaissance a priori des caractéristiques des objets à identifier (spectrales, texturales, forme). L'obtention de cette connaissance a priori repose sur l'identification des différentes occupations du sol en présence par enquête de terrain d'un certain nombre de zones d'échantillonnage appelées aussi parcelles d'entraînement ou « vérités-terrain ». Il est recommandé d'enquêter ~1% du territoire étudié. Compte tenu de la difficulté technique pour réaliser l'enquête de terrain sur l'ensemble de la superficie que couvre une image satellite Spot-5 (~ 60km x 60km), et compte tenu que pour cette étude, seule l'occupation du sol autour des villages était intéressante, il a été décidé de réaliser cette enquête dans un rayon de 2 à 3 kilomètres autour des villages (cf. Figure 14). Ces parcelles d'entraînement seront cartographiées en relevant suffisamment de points GPS.

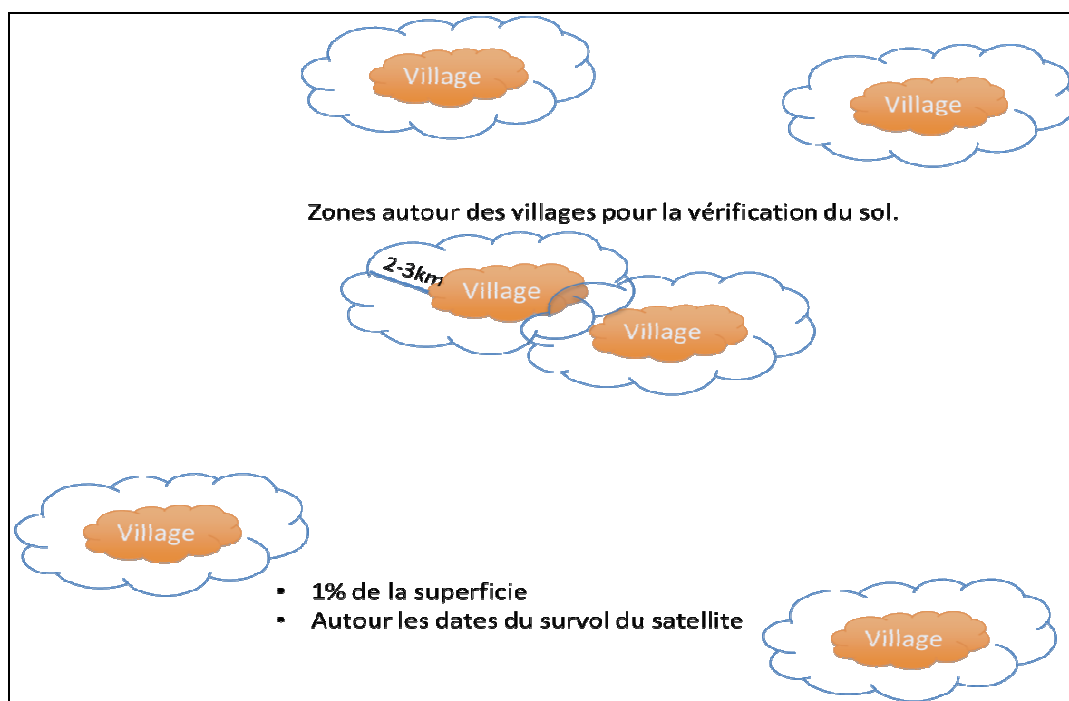


Figure 14 : Enquête sur l'occupation du sol autour des villages de l'étude

3.3. METEOROLOGIE

Des données météorologiques ont été acquises par les dix stations météorologiques automatiques de la région de Nouna et par 10 pluviomètres non automatiques et 10 thermomètres 'min-max' acquis spécifiquement dans le cadre du projet et installés dans chacun des 10 villages de l'étude. Ils ont été supervisés par une personne dans chaque village pour la durée de l'étude et les semaines qui ont précédé (~ 4 semaines).

Tableau 3: Caractéristiques de la collecte des données météorologiques

Données météorologiques	Intervalle de mesure	Collecte des données
Pluviométrie	Chaque jour 7 heures le matin	Chaque 10/14 jours
Température (min-max)	Chaque jour à 7 heures le matin	Chaque ~ 10/14 jours

Des contrôles quantitatifs et qualitatifs des données non automatiques ont été effectués. D'un point de vue quantitatif la présence de nombreuses valeurs manquantes a été notée (surtout en ce qui concerne les données de pluies). En terme de pourcentage de valeurs non-manquantes et sur la période d'analyse, moins de 10% de mesure de précipitation par station ont été relevé et de 0 à 80% pour ce qui est des températures. De plus, quelques erreurs de type températures minimales supérieures aux températures maximales ont aussi été enregistrées, ce type d'erreur représente par exemple jusqu'à 15% des données de température pour le village de Tissi.

En ce qui concerne les données issues des stations automatiques, de nombreux problèmes ont aussi été relevés : un manque de standardisation des formats de sortie des données qui a rendu impossible un traitement aisé de celles-ci. La présence de nombreuses valeurs manquantes et celle de « bug » produisant des périodes avec des valeurs erronées ont été éliminées.

L'objectif initial était en effet de contrôler, corriger et compléter les données issues des stations non automatiques. Toutefois, les résultats des analyses quantitatives et qualitatives des données reçues ont montrées que ces données ne pourraient pas être la principale base de la reconstruction, mais plutôt un support. En effet, ces données, de par leur complète indépendance, ont été utilisées pour valider des données d'estimation reconstruites pour chacune des stations non automatiques en utilisant les données ci-après:

Pour les précipitations : les données RFE¹ et TRMM42BV7² deux produits de fusion (satellite et station in situ), les données issues de la ré-analyse ERA-Interim et les données stations issues du réseau NCDC³ et des stations Paluclim automatiques.

Pour les températures et l'humidité relative : les données issues de la ré-analyse ERA-Interim et les données stations issues du réseau NCDC et des stations Paluclim automatiques.

Le Tableau 4 et la Figure 15 résument les caractéristiques techniques et la position géographique des données produites par ces différentes sources de données.

Tableau 4 : Caractéristiques des données météorologiques

	RFE	TRMM_3B42V7	ERA-interim	NCDC	OBS_auto
Référence	Herman et al. 1997	Huffman et al 2007	Dee H.P. et al. 2011	Smith et al. 2011	Fournies pour Paluclim
Type	Grille 0.1°	Grille 0.25°	Grille 0.75°	station	station
Précipitation	X	X		X	X
Température			X	X	X
Humidité relative			X	X	X

¹ RFE Rainfall Estimate

² TRMM3B42V7 Tropical Rainfall Measurement Mission version 3B42V7

³ National Climatic Data Center (NOAA)

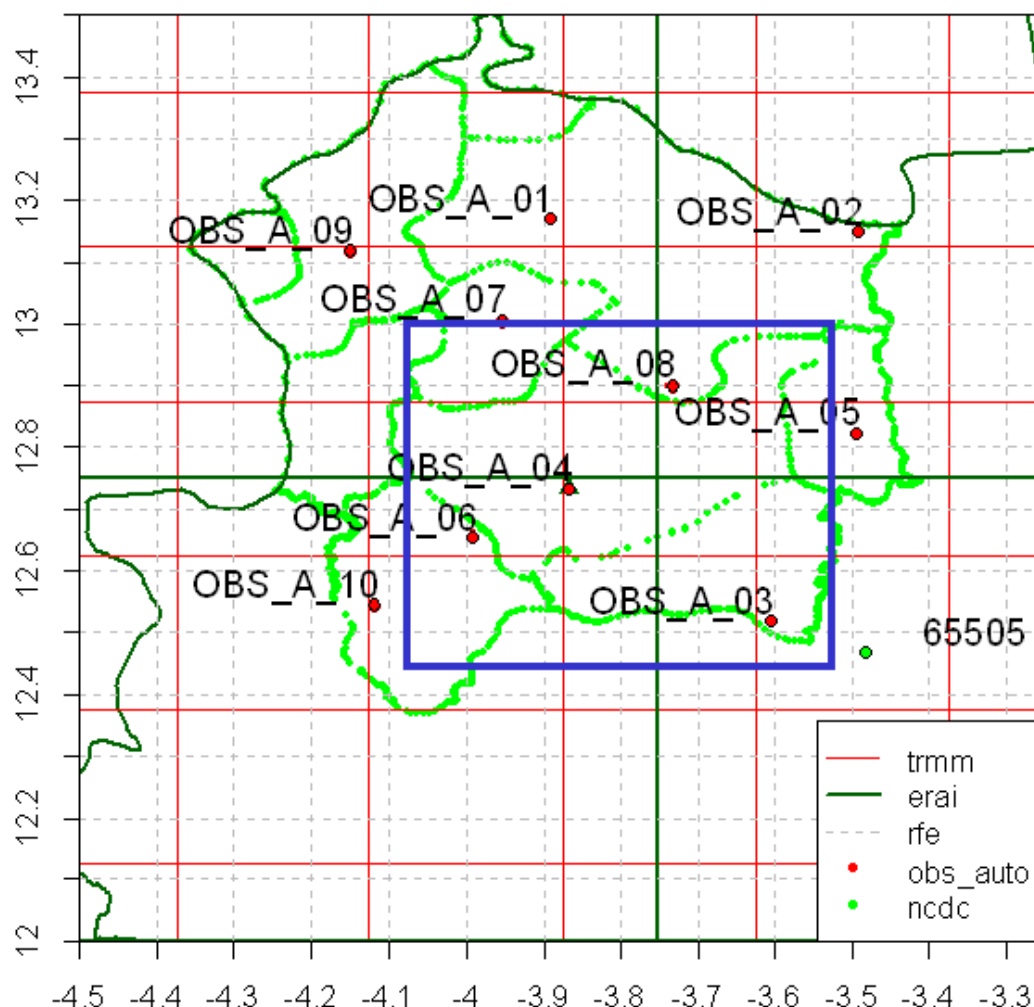


Figure 15 : Données (points de grilles et stations) utilisées au cours du processus d'estimation. Le rectangle bleu désigne la zone d'étude de Nouna

Lors de la construction de ces nouveaux jeux de données, une attention particulière a été accordée à l'heure de la mesure pour assurer la compatibilité entre les différentes sources de données. Le choix de l'utilisation de plusieurs sources de données a été motivé quant à lui par les nombreuses périodes de données manquantes des stations automatiques déployées pour le projet Paluclim ainsi que par la nécessité, surtout en ce qui concerne les précipitations, d'une meilleure résolution géographique lors du processus de reconstruction.

La méthode employée pour reconstruire les estimations, est déterministe et de type pondération inverse à la distance (puissance 2).

En ce qui concerne les précipitations, deux estimations ont été calculées de façon indépendante en utilisant les 4 points les plus proches de chaque village avec les données RFE ou TRMM_3B42V7 puis deux autres en incluant aussi les informations des données stations (NCDC et sta_auto) les plus proches. La moyenne des quatre estimations a ensuite été calculée avec les incertitudes associées (valeurs extrêmes obtenues pour chaque valeur). Notez que les valeurs des estimations ont été mises à zéro si moins de 2 estimations étaient différentes de zéro, mais l'incertitude a toujours été calculée en utilisant les 4 estimations.

Pour les températures et l'humidité relative un processus similaire a été employé avec des sources de données différentes (résumées dans le Tableau 4) et un calcul de l'incertitude estimé par $(\max - \min)/2$.

Le Tableau 5 présente les corrélations entre les estimations obtenues et les données non automatiques de la campagne de terrain pour les différents villages. Les valeurs de corrélation sont données uniquement lorsque l'échelle de l'échantillon est égale ou supérieure à 100 données.

Tableau 5 : Corrélations entre estimation et observations pour les différents villages pour les précipitations et les températures minimales et maximales

<i>station id</i>	<i>cor precip</i>	<i>cor tmin</i>	<i>cor tmax</i>
Kodougou			
Cisse		0,83	0,44
Tissi		0,58	0,03
Konkuini	0,73	0,93	-0,05
Kansara			
Goni	0,37	0,93	0,12
Kamandena	0,64	0,65	0,15
Labarani	0,28	-0,37	0,37
Biron marka	0,55	0,74	0,2
Nouna	0,74	0,62	0,75

On notera les mauvaises corrélations obtenues pour la plupart des séries de températures maximales. Celles-ci s'expliquent par un dysfonctionnement des thermomètres 'min-max' déployés lors de la campagne de mesure.

La station de Nouna est celle qui donne globalement les meilleures corrélations (notamment pour les précipitations). La correspondance pour cette station entre les échantillons est représentée sous forme de nuages de points dans la Figure 16 ci-après, sur lesquels on identifie clairement les mesures erronées qui dégradent les coefficients de corrélation.

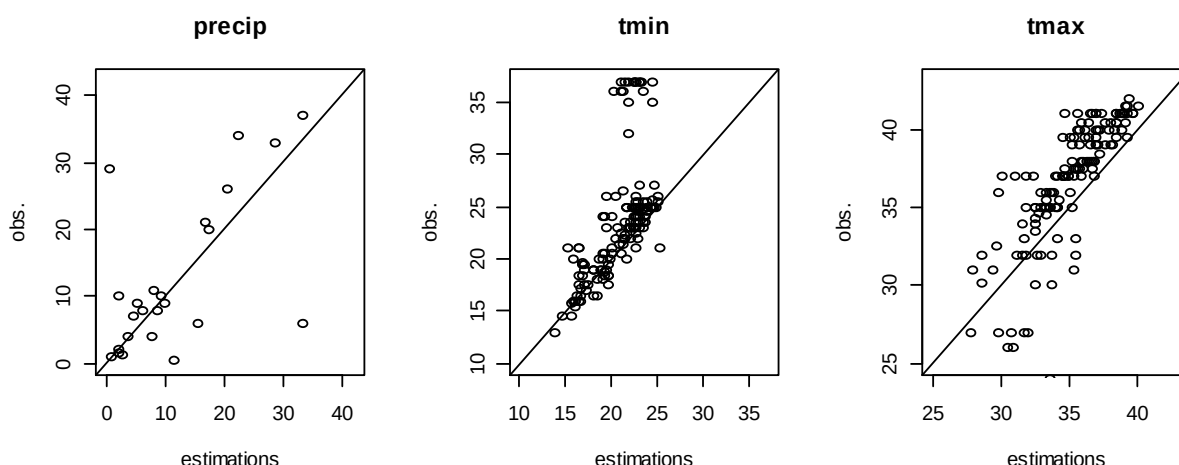


Figure 16 : Graphiques en nuages de points pour la station de Nouna pour les précipitations et les températures minimales et maximales

Un biais pour les températures maximales de 1 à 1.5°C a été relevé entre les estimations et les observations pour la station de Nouna, mais celui-ci est pris en compte dans l'incertitude qui a été fournie avec les estimations.

La bonne cohérence globale entre ses jeux de données permet de valider la méthode d'estimation employée. Cette méthode est potentiellement exportable ensuite à tout autre village de la zone de déploiement des stations automatiques du Projet Paluclim. Les données d'estimation produites pour chacun des villages ont ensuite été utilisées pour construire les cartes du risque entomologique pour la région de Nouna.

3.4. TELEDETECTION

L'acquisition d'une série d'images SPOT 5 a été programmée toute au long de la campagne de terrain soit entre juin 2011 et février 2012.

Pour chaque date, le même type de données a été obtenu que pour 2008 et 2009 à savoir une image HR et une image THR.

Les dates d'acquisition sont les suivantes : 17 juin (fin de saison sèche), 24 septembre (pic de la saison des pluies), 30 octobre (fin de la saison des pluies), 17 février 2012 (saison sèche).

Ces images viennent compléter la série d'images acquises en 2008 et 2009 sur le même site d'étude. Dans un souci de cohérence, les images ont subi le même niveau de corrections radiométriques et géométriques (cf. paragraphes 2.3).

L'analyse de ces images permet d'accéder à différentes variables environnementales en lien avec la présence d'Anophèles (larves et adultes) au travers du calcul de différents indices de télédétection et de l'élaboration de la carte d'occupation du sol (cf. paragraphes 2.3 et 6.1.2).

4. CAMPAGNE DE MESURES 2012

La campagne de mesures 2012 avait deux principaux objectifs :

- Valider les modèles entomologiques (larves et adultes) établis à partir des données de terrain de 2011 permettant l'obtention des cartes de risque vectoriel.
- Démontrer qu'une stratégie larvicide ciblée (orientée) basée sur les cartes de risque vectoriel à l'échelle des villages est possible (démonstration de la faisabilité, analyse des avantages, difficultés et limites), et vérifier que cette stratégie peut améliorer la situation entomologique.

Bilan suivi des collections d'eau

- Au total, 190 collections d'eau ont été échantillonnées entre août et décembre 2012. La plupart des petites collections d'eau se sont taries avec la diminution de la pluviométrie à partir de fin septembre début octobre. Les grandes collections d'eau par contre ont persisté et sont restées productives jusqu'à la fin des prélèvements en décembre.

Bilan suivi des gîtes larvaires

- Les captures des larves ont été faites entre le 4 octobre et le 18 décembre 2012 dans les 10 villages de la zone d'étude. A chaque visite, coïncidant avec les captures des adultes, chaque collection d'eau identifiée a été prospectée afin d'une part d'établir si la collection d'eau était un gîte larvaire productif et d'autre part de déterminer sa densité larvaire. Cette activité coïncidait avec l'application du Bti dans les 5 villages d'intervention.
- Ainsi comme en 2011 des prélèvements de larves et le suivi des gîtes (ph, température, dimension, ombrage, végétation de surface, faune) se sont poursuivis toutes les 2 semaines comme prévu par le protocole.

Il est à noter le démarrage tardif, dans la saison des pluies, de la collecte des larves en raison du retard de livraison du Bti par le fournisseur. En effet, il avait été prévu que la collecte se fasse simultanément à la pulvérisation du larvicide.

Enfin, suite à un problème dans la numérotation pour identifier d'une part les collectes larvaires et d'autre part les points GPS correspondants aux gîtes larvaires, il n'a été possible de construire une base de données géo-référencées cohérente des productivités larvaires par gîte larvaire prospecté.

Bilan suivi captures des moustiques adultes

La collecte d'adultes qui a commencé depuis février 2011 avec des pièges lumineux LTC a été remplacée par des captures sur appât humain après avoir obtenu l'accord du comité d'éthique pour la saison 2012. Entre le 20 juillet et le 13 décembre des captures sur homme ont été menées dans les 10 villages. Les captures dans chaque zone de chaque village ont été faites aux mêmes points que les captures LTC en 2011. Au total 90 points de captures ont été mis en place (30 zones avec 3 points de captures sur homme, voir Figure17).

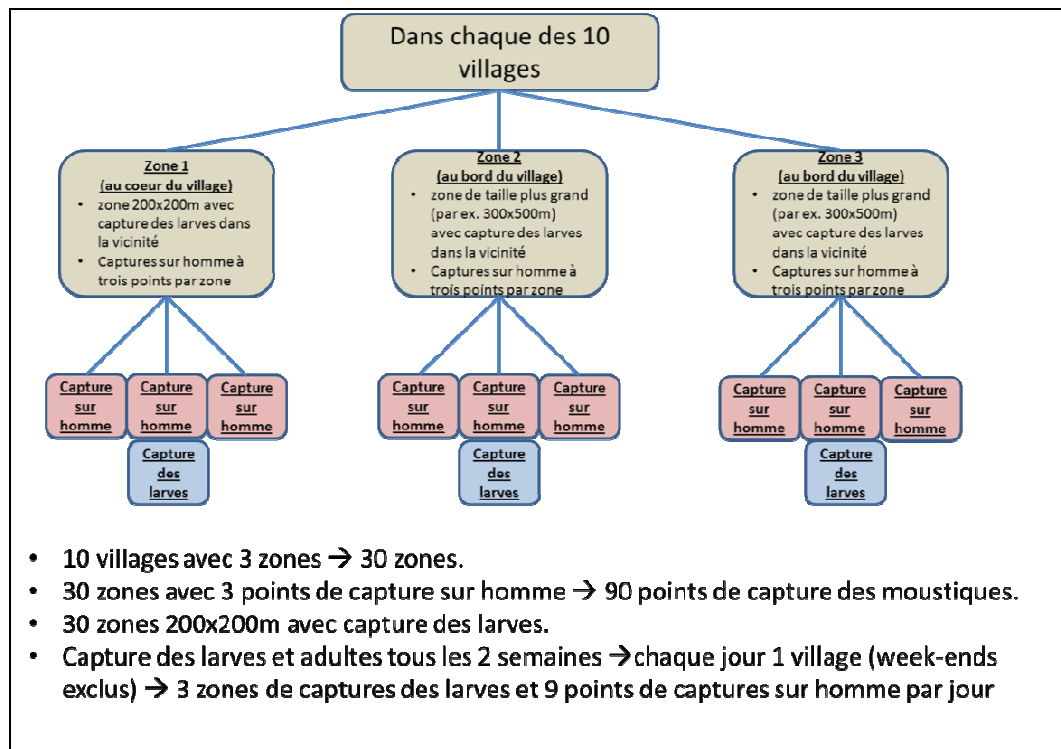


Figure 17 : Organisation des collectes entomologiques en 2012

Dans chaque zone, 3 postes de capture ont été mis en place, 2 à l'extérieur et 1 à l'intérieur d'une maison. Chaque poste de capture est géo-référencé par un point GPS. Les postes ont été numérotés de 1 à 3 dans chaque zone. Le poste 1 est toujours le poste intérieur. Les postes ont été conservés à l'identique pendant toute la durée de l'étude.

Les captureurs ont donné préalablement leur consentement éclairé. Ils ont reçu une vaccination contre la fièvre jaune et ont été placés sous chimio-prophylaxie anti-palustre pendant la durée de l'étude et un mois après. Pour chaque poste, deux captureurs se sont relayés toutes les 2 heures, de 18h à 6h. Les captureurs ont tourné sur les différents postes au long des séances afin de minimiser les biais d'échantillonnage dus à des différences d'attractivité individuelle. Les moustiques se posant sur les jambes des capteurs ont été collectés dans des tubes en verre bouchés avec du coton, puis rangés dans des sacs (1 sac différent pour chaque poste et heure de capture).

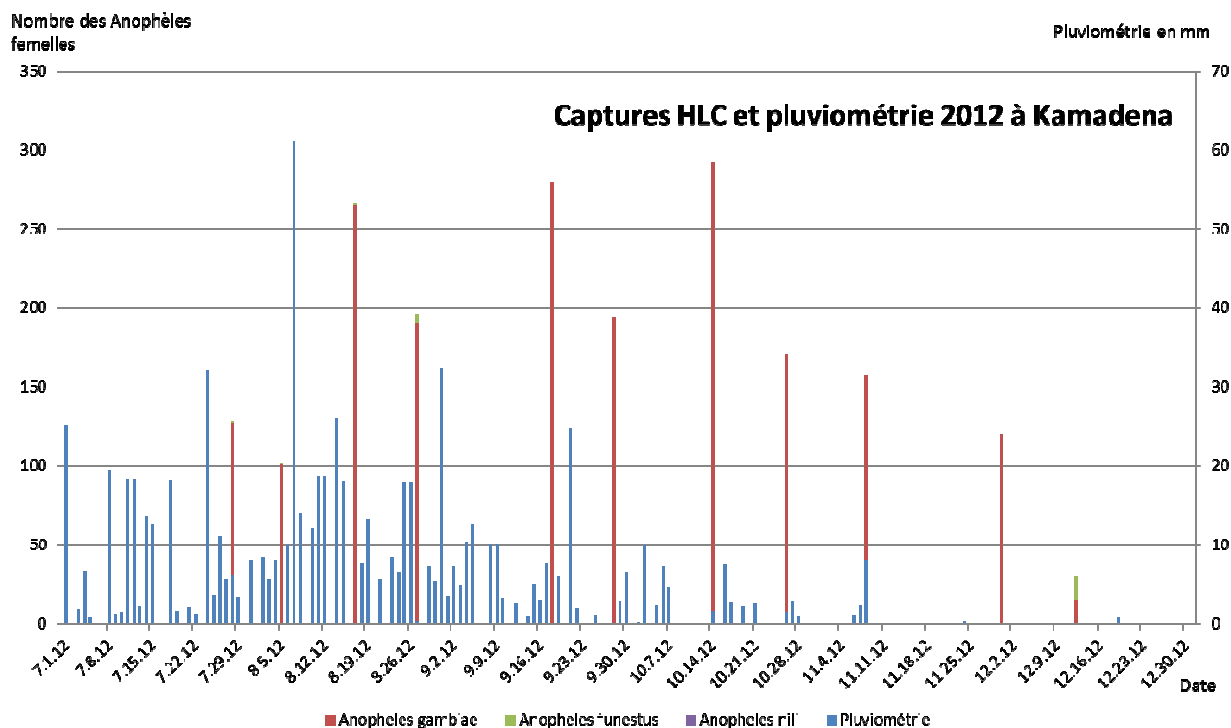


Figure 18 : Pluviométrie et bilan de la collecte d'anopheles adultes sur le village de Kamadena

Le nombre de moustiques capturés pendant la saison des pluies 2012 reflète le risque calculé et montrent leur abondance au cours de l'année. L'évolution du nombre de moustiques se caractérise par une croissance assez rapide puis par un plateau entre fin août et mi-octobre et enfin par une diminution progressive de mi-octobre à mi-décembre. Il faut aussi noter que cette évolution coïncide avec à la distribution annuelle des précipitations mais avec un décalage de près d'un mois. La Figure 18 montre un exemple de cette évolution temporelle pour le village de Kamadena.

5. ANALYSE CLIMATIQUE

5.1. CLIMATOLOGIE DE LA ZONE DE NOUNA (1983-2011)

L'analyse climatique a été effectuée sur la période 1983-2011 pour la région de Nouna. Des jeux de données ont été produits en utilisant les données ARC2⁴ pour les précipitations (version climatologique des données RFE employées précédemment dans les processus d'estimation des précipitations par village) et ERA-interim pour les températures et l'humidité relative. Ce choix de simplification du processus d'estimation a été motivé par la nécessité d'avoir des jeux de données homogènes sur une longue période de temps. Une climatologie spatiale mensuelle pour la période 1983-2011 de la zone d'étude est présentée dans les Figures 19, 20, 21 et 22 pour les trois paramètres :

⁴ ARC2 Africa Rainfall Climatology version2

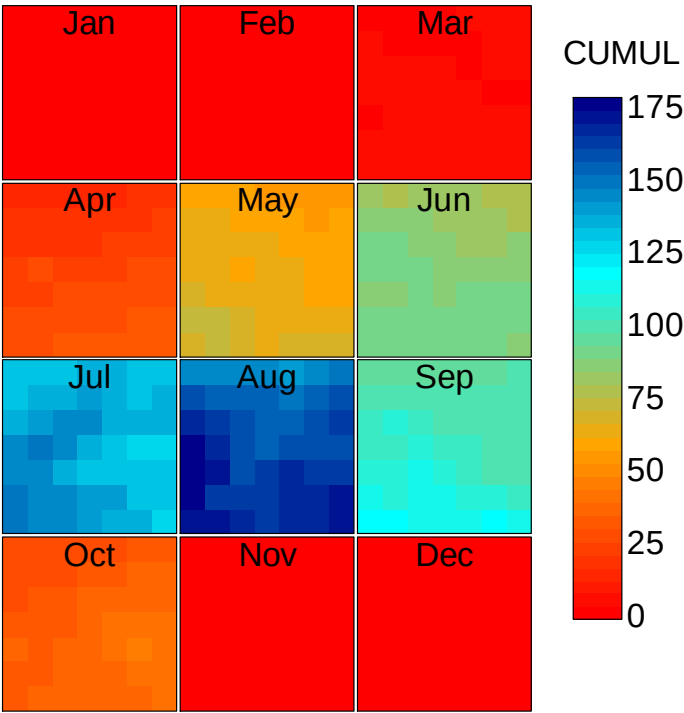


Figure 19 : Cartes de la climatologie mensuelle du cumul des précipitations en mm pour la zone de Nouna (4.1/3.5°Ouest et 12.4/13°Nord) pour la période 198 3-2011

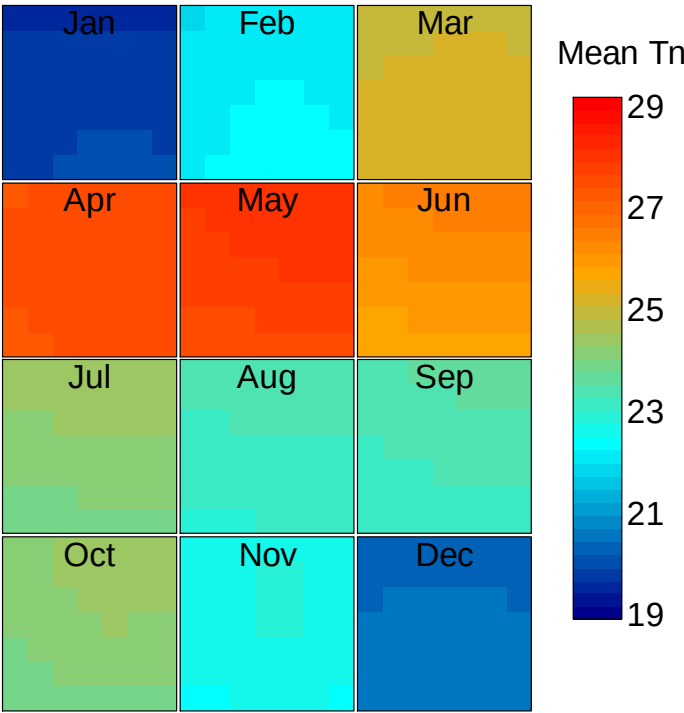


Figure 20 : Cartes de la climatologie mensuelle des températures minimales en °C pour la zone de Nouna (4.1/3.5°Ouest et 12.4/13°Nord) pour la période 198 3-2011

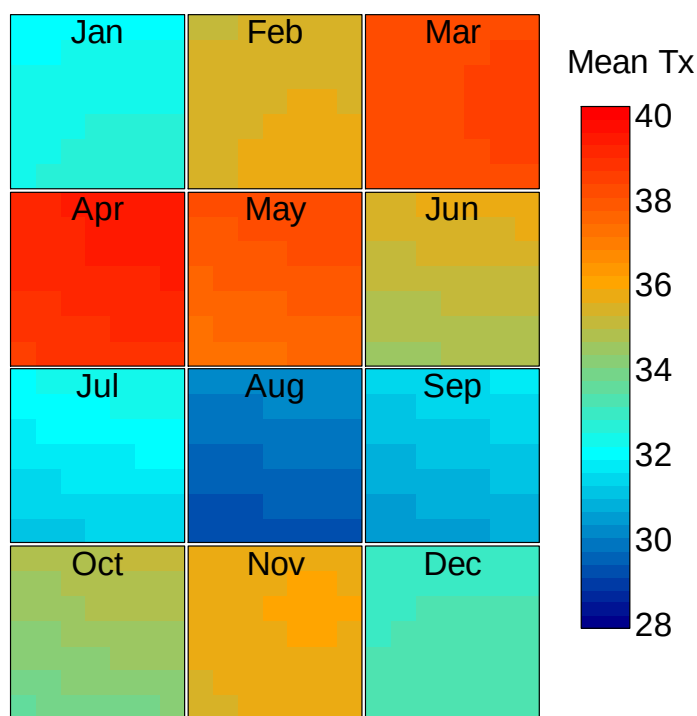


Figure 21 : Carte de la climatologie mensuelle des températures maximales en °C pour la zone d'étude de Nouna (4.1/3.5°Ouest et 12.4/13°Nord) pour la période 1983-2011

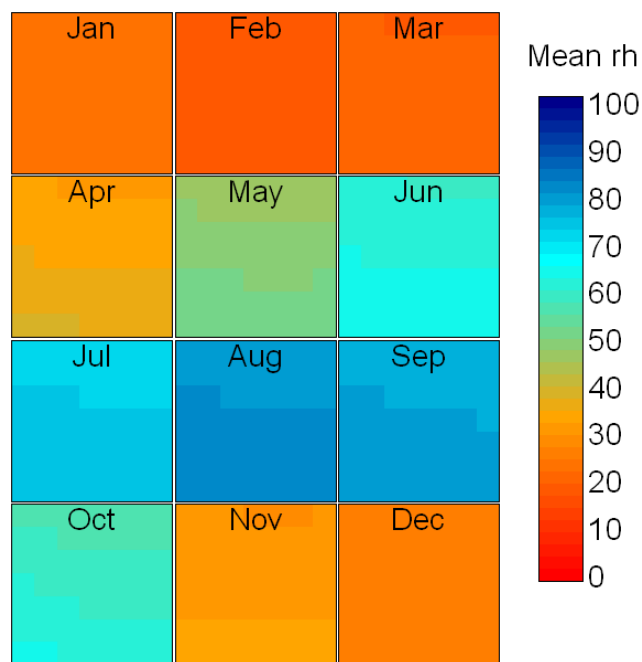


Figure 22 : Cartes de la climatologie mensuelle de l'humidité relative en % pour la zone d'étude de Nouna (4.1/3.5°Ouest et 12.4/13°Nord) pour la période 1983-2011

Une analyse de la perte d'information engendrée par le passage du niveau point de grille présentée ci-avant vers une seule série représentant l'ensemble de la zone de Nouna (Série_z) a été effectuée. Cette Série_z représente la moyenne des données sur la zone 4.1/3.5°Ouest et 12.4/13°Nord. Le biais, la corrélation, l'erreur moyenne absolue (EAM) et l'erreur quadratique moyenne (RMSE) ont ensuite été évalués entre la Série_z et chaque point de grille de la zone de Nouna.

Pour ce qui est des précipitations le biais est compris entre -1 et 1 mm structuré en gradient avec des biais plus importants d'Avril à Octobre et généralement positif au nord du gradient indiquant que la Série_z surévalue les précipitations dans cette zone et l'inverse au sud. L'axe du gradient évolue au cours de la saison avec un angle SO – NE (Avril, Juillet-Août) et NO – SE (Mai-Juin, Septembre). Pendant la saison des pluies les corrélations entre la Série_z et les points de grille sont supérieures à 0.75 avec les meilleures corrélations en Juin indiquant une distribution des pluies très homogènes pour ce mois. L'EAM

est inférieure à 3 et la RMSE est faible (< 8) avec dans les deux cas des variations géographiques très faibles.

En ce qui concerne les températures le biais est compris entre 0 et -1°C (-0.2 à 1.5°C) pour les températures minimales (maximales) donc présente une très légère tendance froide (chaude). Pendant la saison des pluies les corrélations entre la Série $_z$ et les points de grille sont supérieures à 0.95 avec les meilleures corrélations au sud (nord) pour les températures minimums (maximales) ce qui est cohérent avec les résultats du biais et du climat générale de la zone plus chaud au nord qu'au sud. L'EAM et la RMSE présentent des valeurs négligeables.

Enfin dans le cas de l'humidité relative le biais est compris entre $\pm 4\%$ avec un gradient de Mars à Septembre dénotant pour la Série $_z$ une surévaluation de l'humidité au nord et une sous-évaluation au sud. Cela étant en parfaite cohérence avec la position géographique de la zone d'étude. En effet, le département de Nouna se caractérise par une oscillation entre une prépondérance d'un air sec avec la masse tropicale continentale venant du nord-est par l'intermédiaire du vent harmattan et une prépondérance d'air l'humide avec la masse d'air maritime tropicale venant du sud-ouest. Les corrélations entre la Série $_z$ et les points de grille sont supérieures à 0.97, l'EAM et la RMSE présentent des valeurs négligeables.

Cette analyse de l'impact du passage de points de grille vers une moyenne zonale (Série $_z$) montre que, au cours de ce processus, la perte d'information a été peu significative. La Figure 23 représente la climatologie de la zone de Nouna (Série $_z$) des précipitations, températures et de l'humidité relative calculée sur la période 1983-2011.

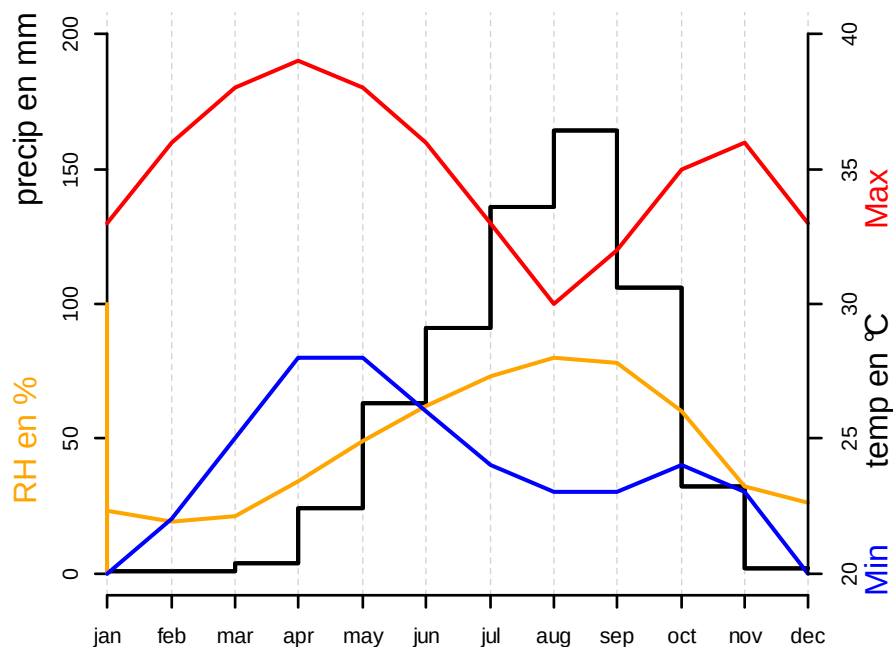


Figure 23 : - Climatologie annuelle de la zone de Nouna (Série $_z$) calculée sur la période 1983-2011. En noir (orange) est représenté l'évolution du cumul mensuel des précipitations (de la moyenne mensuelle l'humidité relative) axes de ordonnées de gauche. En rouge (bleu) est représenté l'évolution de la moyenne mensuelle des températures maximales (minimales) axe des ordonnées de droite

5.2. ANALYSE DU CLIMAT AUX DIFFERENTES ECHELLES SPATIO-TEMPORELLE

5.2.1. Analyse climatique du risque palustre de la période 1983-2011

Pour évaluer l'incidence des conditions climatiques sur le risque palustre dans sa globalité, il est nécessaire d'utiliser un modèle d'impact. Le modèle choisi dans cette partie s'inspire des travaux de Craig (Craig et al., 1999 ou Ermert et al., 2011), avec la modification proposée dans le cadre du projet MARA Mapping Malaria Risk in Africa project (Tanser et al., 2003). Il consiste à calculer des indices (notés IND) de conditions favorables au développement du paludisme, avec des valeurs comprises entre 0 (état impropre, U pour « unsuitable ») et 1 (état favorable, S pour « suitable »), pour la température, les précipitations et l'humidité.

Il est clair que ce type d'indice ne peut résumer la complexité des mécanismes de la transmission, de l'infection des vecteurs et des humains et de la maladie. Les cartographies développées dans le cadre de PALUCLIM s'attachent à intégrer une partie de cette complexité, par la prise en compte de facteurs

environnementaux à différents stades du développement du moustique, stades larvaire et adulte. Ces facteurs environnementaux ne peuvent pas intervenir au niveau des infections et de la maladie humaine, seulement au niveau vectoriel. Au niveau des vecteurs, les facteurs environnementaux sont par ailleurs connus pour interagir de façons complexes dépendant des espèces de moustiques et encore très partiellement connues. Une telle complexité ne peut donc pas être appréhendée actuellement dans sa globalité et une simplification est indispensable. Les indices utilisés ici ne sont donc pas directement comparables, par exemple, à des mesures terrain de quantité de larves ou de moustiques adultes, ni d'agressivité. En revanche leur simplicité permet un diagnostic de l'évolution des conditions climatiques moyennes (passées, et futures dans le cadre du changement climatique potentiel) favorables à l'existence d'une transmission, toutes choses étant égales par ailleurs et pour peu que le réservoir humain de parasites la permette.

Le Tableau 6 résume ces conditions favorables pour la pluviométrie, la température et l'humidité relative.

Tableau 6 : Conditions favorables au développement du paludisme

	range	Valeur de l'indice	Condition U	Condition S
Précipitation mensuelle cumulée (en mm)	>80	1		
	≥60 and <80	Equation1	60	80
Moyenne mensuelle de min ou max de température (en °C)	<18 or >40	0		
	≥ 22 or ≤32	1		
	>18 and <22	Equation2	18	22
	>32 and <40	Equation1	40	32
Moyenne mensuelle de l'humidité relative (en %)	<60	Equation2	0	60
	≥60	1		

Les équations mentionnées dans le tableau 7 sont les suivantes:

$$equation1 = \cos^2 \left[\frac{x - S}{U - S} \times \frac{\pi}{2} \right] \text{ avec } S < x < U$$

$$equation2 = 1 - \cos^2 \left[\frac{x - U}{S - U} \times \frac{\pi}{2} \right] \text{ avec } U < x < S$$

Les conditions favorables de température ont été établies suite à l'analyse des relations entre la température et la durée de la sporogonie, la survie des moustiques et de la durée du cycle larvaire (Craig et al. 1999). Les conditions d'humidité relative visent à exclure les périodes de sécheresse. Quant au facteur précipitations, un cumul suffisant est essentiel pour qu'une épidémie de paludisme soit possible. En effet, dans les régions où la température est élevée mais où les précipitations sont un facteur limitant, comme dans notre zone d'étude, les populations de moustiques augmentent rapidement au début de la saison des pluies. Dans l'analyse de Craig et al. (1999), effectuée sur le Mali, il a été établi que trois mois de pluie peuvent être suffisant pour constituer une saison favorable à la transmission du paludisme et que ces trois mois doivent présenter un cumul supérieur à 80mm pour que des conditions très favorables soient réunies. Depuis, le MARA Seasonality Model (MSM - module de saisonnalité développé par Tanser et al. (2003)) a été développé pour compléter le modèle de distribution du paludisme (projet MARA Mapping Malaria Risk in African project). Selon ce modèle, seul un mois de 80 mm est nécessaire, les deux autres qui suivent ce catalyseur doivent juste être supérieurs à 60 mm pour que les conditions reste favorables.

Aussi, les conditions de précipitation cumulées suivantes ont été sélectionnées pour notre étude : premier mois doit être supérieur ou égal à 80 mm et doit être suivi par deux autres mois au moins supérieurs à 60 mm (favorable) et dans l'idéal supérieurs à 80mm (très favorable). Par conséquent, les séquences coulissantes de trois mois à IND = 1, IND > 0, IND > 0 ont été analysées.

Outre cette approche mensuelle, l'analyse a été poursuivie en analysant :

- Le séquençage du nombre de jours consécutifs de pluie par mois pour discriminer entre les pluies uniformément réparties et la présence de longues périodes de sécheresse entre des épisodes de pluie intense.
- Et le nombre de jours avec des conditions appropriées de température pour chaque mois ainsi que celui présentant des valeurs suffisamment extrêmes pour réduire de façon drastique la population de moustiques.

Des informations sur les mois présentant des conditions favorables en précipitations, température ainsi qu'en humidité relative ont pu ainsi être obtenues pour la période 1983-2011 ainsi que des détails sur le séquençage mensuelle de ces paramètres. Les résultats présentés dans la Figure 24 peuvent se lire comme une cartographie temporelle des conditions de précipitation, d'humidité relative et de température favorables au développement du paludisme pour les années 1983 à 2011. Les mois qui ne présentent pas des conditions moyennes favorables sont en blanc. Pour les précipitations, la présence d'un X indique que le cumul mensuel est supérieur à 80mm et le premier mois caractérisé par le dépassement de ce seuil est noté en rouge. Les années marquées en rouge sont celles qui ne comprennent pas l'ensemble des conditions de précipitation nécessaires sur la saison pour le développement du paludisme. Les résultats mensuels ont été divisés en classes dont les codes de couleur sont expliqués au bas de la Figure 24. L'indice annuel lié aux précipitations de conditions favorables au développement du paludisme est indiqué dans la colonne indice (en bleu). Les indices liés aux autres paramètres ne sont pas indiqués car leur variabilité est peu significative et leur apport d'information est donc aussi peu significatif.

	Précipitation								RH							Température											
YEAR	mai	juin	juillet	août	sept.	oct.	indice	mai	juin	juillet	août	sept.	oct.	janv.	fév.	mars	avril	mai	juin	juillet	août	sept.	oct.	nov.	dec.		
1983			X	X			0,0		90	100	100	100															
1984			X		X		2,4		50	100	97	93	42														
1985			X	X			0,0		67	100	100	100	39														
1986		X	X	X	X		4,0	39	80	100	100	100	48														
1987		X	X	X			3,0		93	97	100	100	61														
1988			X	X	X		3,0		63	100	100	100	39														
1989			X	X			2,8		40	97	100	100	52														
1990	X			X			2,9		57	100	100	100	35														
1991	X			X			0,0	55	73	100	100	100	58														
1992			X	X			0,0	26	90	97	100	100	58														
1993		X	X	X	X		4,0		43	87	100	100	58														
1994			X	X	X		3,0		60	100	100	100	100														
1995			X		X		2,0	39	70	94	100	100	58														
1996			X	X			2,2		73	84	100	100	74														
1997			X	X	X	X	4,0	35	90	100	100	100	71														
1998	X		X	X	X		4,5	23	73	97	100	100	74														
1999		X	X	X	X		4,0		20	100	100	100	68														
2000	X		X	X	X		4,8		63	94	100	100	39														
2001		X	X	X	X		4,0		80	100	100	100	32														
2002	X	X	X	X	X		5,0		33	87	100	97	45														
2003	X	X	X	X	X		5,0		87	100	100	100	71														
2004		X	X	X			3,0		43	97	100	100															
2005		X	X	X	X		4,0		60	100	100	100	45														
2006	X	X	X	X	X	X	6,0		27	90	100	100	90														
2007		X	X	X	X		4,0		40	100	100	100	13														
2008	X	X	X	X	X		5,0		47	100	100	100	48														
2009	X	X	X	X	X	X	6,0		50	97	100	100	77														
2010	X	X	X	X	X		5,3	19	77	94	100	100	100														
2011		X	X	X	X		4,0		50	87	100	100	58														

% de jours de pluie par mois	
	plus de 60 %
	40-60% avec des séquences sèches de moins de 4 jours
	40-60% avec des séquences sèches de plus de 4 jours
	25-40%
	moins de 25%
% de RH indiqué en chiffre dans chaque case	
	moins de 50% de jours favorables
	plus de 50% de jours favorables
Température de plus de 50% des jours par mois	
	22-32°C
	32-40°C
	supérieur à 40°C
	18-32°C

Figure 24 : Cartographie temporelle des conditions climatiques favorables à l'apparition du paludisme

Pendant la saison de mousson Juin-Septembre en moyenne, les conditions d'humidité relative sont très favorables. En ce qui concerne les températures, elles sont le plus souvent favorables mais dans une gamme de températures un peu élevée (32-40°C). Des températures maximales extrêmes sont présentes le plus souvent en Avril, celles-ci précèdent l'arrivée de la saison des pluies. De plus, la figure 25 met en évidence, en ce qui concerne les précipitations, deux périodes : une première de 1983 à 1996 avec des saisons de mousson courtes qui commencent relativement tardivement ou assez sèches ; puis des saisons de mousson plus longues avec des conditions favorables au développement du paludisme qui commencent plus tôt et finissent plus tard. Ces deux périodes se retrouvent aussi dans l'évolution de la valeur de l'indice lié aux précipitations et présentée dans la Figure 25.

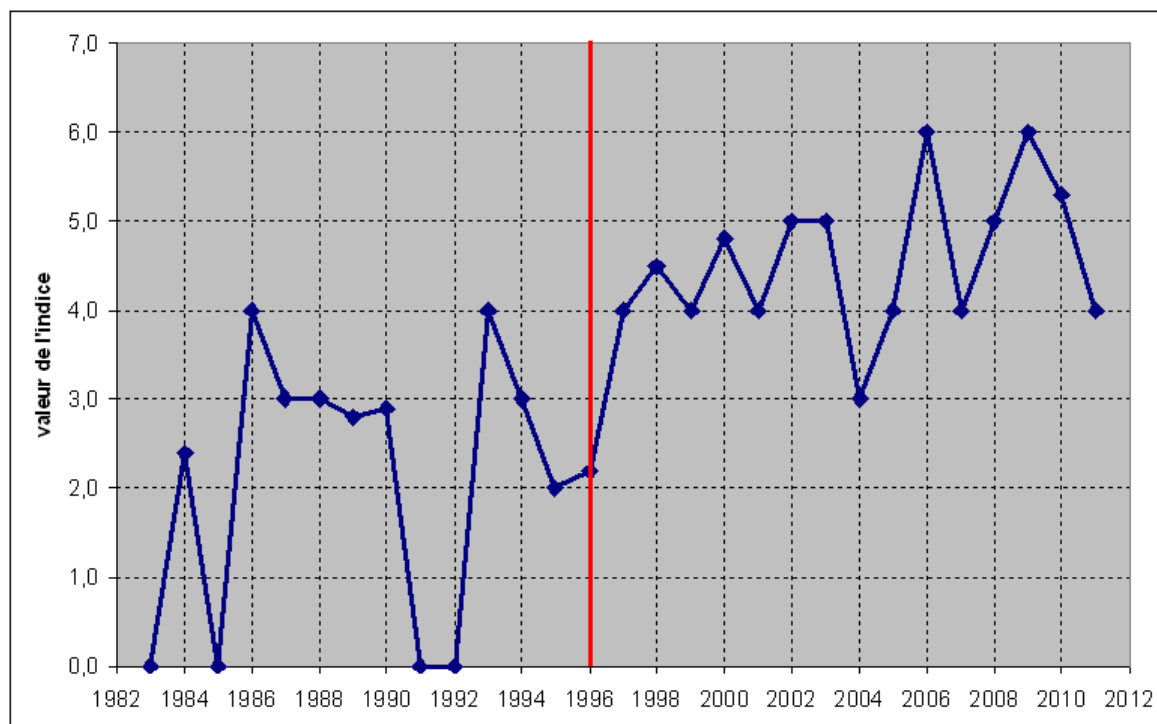


Figure 25 : Evolution de la valeur de l'indice des conditions de précipitations favorables au développement du paludisme de 1983 à 2012. La période après 1996 correspond à des indices > 3.

5.2.2. Variations climatiques naturelles des précipitations

Selon l'indice de risque présenté précédemment, le paramètre qui a principalement modulé la variabilité des conditions favorables au paludisme au cours des 30 dernières années dans la région de Nouna est le cumul mensuel de précipitations. Il est donc important, dans l'optique d'une anticipation du risque, de connaître les influences climatiques qui font varier les cumuls de précipitations mensuels et saisonniers. Ces influences pourront aider à construire la descente d'échelle des prévisions saisonnières.

Les précipitations ont vraisemblablement connus une évolution importante sur la période 1983-2011, suffisante pour modifier sensiblement la valeur de l'indice de conditions favorables. Un des facteurs climatique « basse-fréquence » connu pour être influent sur les précipitations au Sahel est l'AMO (l'Oscillation Multi-décennale de l'Atlantique), tel que décrit dans Zhang et al. 2006 et Paz et al 2008. D'autres sources de variabilité interannuelle et intra-saisonnière sont testées sur la série de données de Nouna. L'analyse présentée ci-dessous a consisté à calculer des corrélations décalées (décalage autorisé jusqu'à moins 9 mois) entre cette série et les indices correspondants aux facteurs à tester.

- **L'Oscillation Multi-décennale de l'Atlantique (AMO, Atlantic Multi-decadal Oscillation en anglais)**

Avec un décalage d'un mois, une corrélation de 0.66 (0.69) entre les précipitations de la zone de Nouna et l'AMO pour la séquence temporelle cumulée JAS (ASO) a été obtenue. L'AMO s'apparente à la variabilité de la circulation thermohaline océanique (Knight et al., 2005) et présente une signature de surface avec des variations de la température de surface de la mer (SST). Son cycle est de 50 à 70 années et il correspond à la moyenne de la SST au nord de l'Océan Atlantique (60°N à l'équateur / 75°W - 7.5°W). Cet indice (version décrite dans Enfield et al., 2001 ; <http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/correlation/amon.us.data>) a montré une tendance négative de 1960 à

1995 puis positive de 1995 à aujourd'hui. La tendance négative (positive) de l'AMO tend à réduire (augmenter) les précipitations au Sahel. Cette corrélation est en accord avec les deux périodes observées dans le tableau de la cartographie temporelle des conditions de précipitation favorables au développement du paludisme.

- **L'Oscillation Nord Atlantique (NAO, North Atlantic Oscillation en anglais)**

Avec un décalage d'un mois, une corrélation de -0.56 (-0.52) entre les précipitations de la zone de Nouna et la NAO (version NOAA Climate Prediction Center, CPC) :

<http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/correlation/nao.data>

pour la séquence temporelle cumulée JAS (ASO) a été obtenue. Découverte dans les années 20 par Walker (1924), la NAO (Bjerknes, 1964) est un phénomène majeur touchant le système climatique du nord de l'Océan Atlantique. Les variations de cette oscillation se mesurent généralement comme la différence de pression atmosphérique entre l'Anticyclone des Açores (station météorologique Lisbonne ou Ponta ou Delgada ou Gibraltar, etc) et la dépression d'Islande (station météorologique : Reykjavik ou Stykkisholmur ou Akureyri, etc.) et moins la différence des anomalies de pression est importante plus l'indice de la NAO est négatif. Lors d'une phase négative de la NAO, le jet stream se situe plus au sud que lors d'une phase positive, l'Afrique du nord bénéficie ainsi d'un air plus humide que la normale.

- **Autres oscillations climatiques**

Le lien avec d'autres oscillations climatiques a été évalué, à travers d'indices océaniques pour l'atlantique (boîtes NAT, SAT, TNA, TSA et indice TASI, Tourre et al., 2010) pour l'océan indien (SETIO, SWIO, WTIO et indice DMI) et pour le pacifique (NINO3.4, PDO, Zhang et al., 1997) ainsi que des indices atmosphériques (QBO, WHWP). Une description de ces indices est disponible sur le site de l'OOPC (Ocean Observations Panel for Climate) <http://ioc-goos-oopc.org/>

Les résultats des corrélations avec décalage temporel ne présentent pas de résultats significatifs et ils ne sont donc pas présentés dans ce rapport. Une étude complémentaire prenant en compte la variabilité du tripole Atlantique, une combinaison de l'AMO et du TNA (indice à partir des trois centres de la température de l'océan Atlantique Nord, suivant Paeth et al., 2003) devrait être envisagée dans le futur.

5.2.3. Prévisibilité saisonnière du risque palustre

Sur la région de Nouna, au cours de la période 1983-2011, l'indice de risque palustre défini précédemment montre une sensibilité au paramètre « cumul mensuel de précipitations ». Dans cette partie, on examine donc la prévisibilité du dépassement du seuil mensuel de 80 mm. Trois approches sont comparées :

- La prévision climatologique
- La prévision climatologie selon les phases de l'AMO
- La prévision saisonnière à l'aide du modèle ARPEGE de Météo-France

5.2.3.1. La prévision climatologique

La prévisibilité mensuelle a été évaluée, en premier lieu, en utilisant les observations de précipitations moyennées sur la zone de Nouna (période 1983-2011) pour calculer la probabilité de dépassement du seuil mensuel de 80 mm de précipitation. Cette probabilité de dépassement de seuil est présentée Figure 26. Les valeurs mensuelles égales ou supérieures à une probabilité de 0.5 ont été sélectionnées comme marquant les mois avec dépassement du seuil 80 mm de précipitation ($IND_p = 1$). La Figure 26 indique donc que les cumuls des mois de juillet, août et septembre dépassent le seuil 80 mm (selon la climatologie de la période 1983-2011), alors qu'ils sont inférieurs à 80 mm les autres mois.

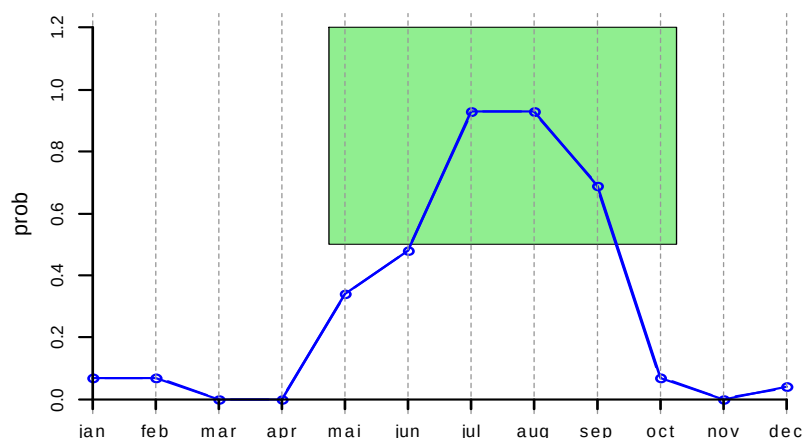


Figure 26 : Probabilité mensuelle de dépassement du seuil 80mm de précipitation pour la zone de Nouna en utilisant la climatologie des précipitations pour la période 1983-2011. Probabilité inférieure à 0.5 : pas de dépassement / Probabilité égale ou supérieure à 0.5 dépassement du seuil.

Le pourcentage de prévisions correctes qui résulte de ce mode de prévision est détaillé Figure 27.

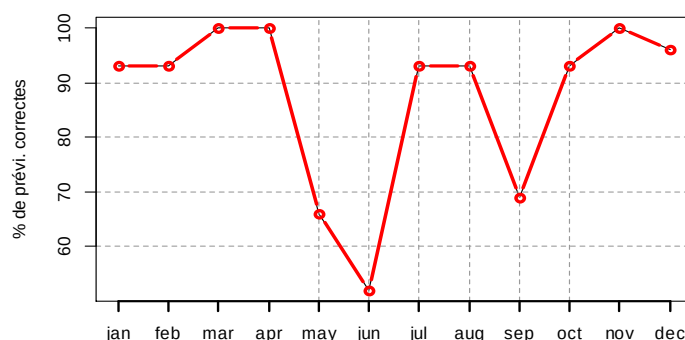


Figure 27 : Pourcentage mensuel de prévisions correctes pour la période 1983-2011 en utilisant la climatologie

La Figure 27 montre une très bonne prévisibilité (hors mois de mai, juin et septembre) avec un pourcentage de prévisions correctes de plus de 90%. En revanche, les mois de mai, septembre et surtout juin présentent une prévisibilité faible.

5.2.3.2. La prévision climatologique selon les phases de l'AMO

L'importance de l'AMO vis-à-vis des précipitations à Nouna a été mise en évidence précédemment. Dans cette section la climatologie a été décomposée selon la phase de cette oscillation : phase négative 1983-1995, phase positive 1996-2011. Les résultats de la probabilité de dépassement du seuil 80 mm en fonction de ces phases sont présentés dans la Figure 28.

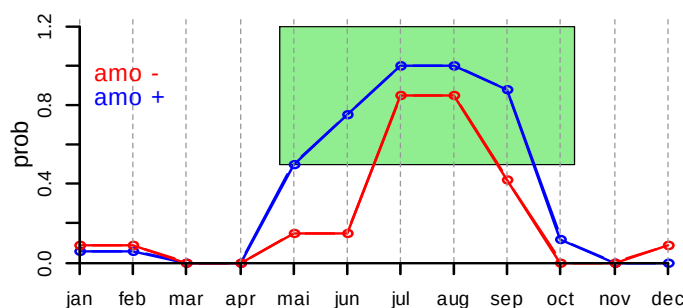


Figure 28 : Probabilité mensuelle de dépassement du seuil 80mm de précipitation pour la zone de Nouna en utilisant la climatologie des précipitations pour la période 1983-2011 décomposée selon la phase de l'AMO. Courbe rouge (bleue) probabilité à utiliser lors des phases négatives (positives) de l'AMO. Probabilité inférieure à 0.5 : pas de dépassement / Probabilité égale ou supérieure à 0.5 dépassement du seuil.

Selon la Figure 28 et avec un seuil de décision correspondant à la probabilité 0.5, les prévisions de dépassement du seuil 80 mm en mai, juin et septembre sont différentes selon la phase positive de l'AMO. En revanche, les prévisions de juillet et août sont indépendantes de la phase de l'AMO.

Le pourcentage de prévisions correctes qui résulte de ce mode de prévision est détaillé dans la Figure 29.

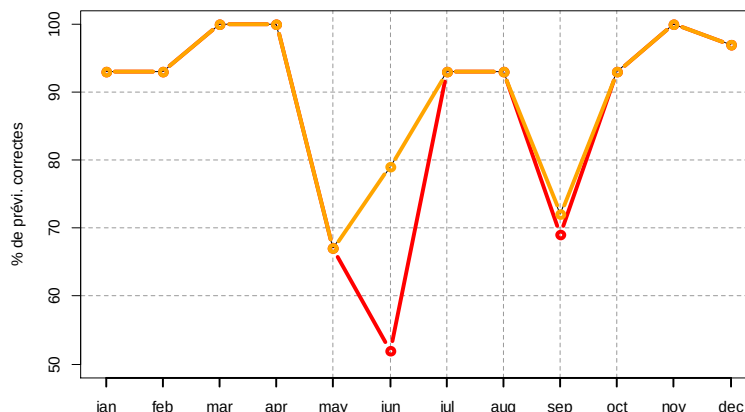


Figure 29 : Pourcentage mensuel de prévisions correctes pour la période 1983-2011 en utilisant la climatologie (courbe rouge) et la climatologie décomposée selon les phases de l'AMO (courbe orange)

La prise en compte de l'information de la phase de l'AMO a permis d'améliorer nettement la prévisibilité du mois de juin (le pourcentage de prévisions correctes passe de 52 à 79%), d'améliorer faiblement la prévisibilité du mois de septembre (de 69 à 76%) et ne modifie pas la prévisibilité des autres mois par rapport à l'utilisation de la climatologie décrite dans la section précédente.

5.2.3.3. La prévision saisonnière à l'aide du modèle ARPEGE de Météo-France

Depuis 1999, Météo-France dispose d'un modèle opérationnel de prévision saisonnière. Plusieurs versions se sont succédées, jusqu'aux versions récentes qui sont des modèles couplés océan-atmosphère. La plupart des grands centres météorologiques disposent de tels modèles, qui sont de plus en plus en plus utilisés pour des applications dans le domaine de l'agriculture, de la santé et de la gestion de la ressource en eau. Concernant plus particulièrement ARPEGE, une application hydrologique sur l'Afrique tourne de manière opérationnelle depuis 2005, elle fournit une prévision de remplissage du barrage de Manantali sur le fleuve Sénégal (Bader et al. 2006).

C'est donc en toute logique que l'on teste ici l'utilisation d'un modèle de prévision saisonnière pour anticiper le risque palustre sur la région de Nouna. Dans l'optique d'utiliser l'indice de risque de Craig, on se concentre sur une prévision de la probabilité de dépasser le seuil 80 mm à l'échelle mensuelle, pour la saison à venir. La tâche est donc relativement ardue pour des systèmes de prévisions plus adaptés à des prévisions moyennes sur une saison. Par ailleurs, la référence à battre (la climatologie selon la phase de l'AMO) est déjà très performante.

Le modèle ARPEGE

Le modèle de prévision saisonnière utilisé est Arpege « Système 3 » (Salas y Méliá et al. 2005). C'est un modèle numérique global couplé océan-atmosphère utilisant Arpège v4 (grille T63L91) pour la composante atmosphérique, OPA8.2 (grille orca de 2° en surface libre) pour la composante océanique et le coupleur Oasis v2.4 géré par le Cerfacs pour l'interface entre les deux. Cette version opérationnelle permet d'obtenir post 2007, des ensembles de 41 membres constitués avec des conditions initiales différentes et couvrant une période de 7 mois post-initialisation au pas de temps journalier (le premier mois est le mois de relaxation du modèle et ne sera donc pas utilisé comme résultat de prévision).

Du fait de la mise à disposition d'une ré-analyse océanique Mercator pour la période 1979-2007, une expérience de référence de 29 ans a été constituée avec ce système 3 ; celle-ci comprend 11 membres de prévisions a posteriori (« hindcast ») de 7 mois post-initialisation au pas de temps journalier (le premier mois est le mois de relaxation du modèle et ne sera donc pas utilisé comme résultat de prévision). Pour les conditions initiales, l'expérience de référence utilise pour l'atmosphère les données ERA40 alors que le modèle opérationnel utilise les conditions atmosphériques tirées des analyses opérationnelles du CEPMMT.

C'est la période de hindcast, recouvrant notre période d'étude, qui a conditionné le choix de la version 'système 3 ». Le hindcast de ARPEGE « système 4 » actuellement opérationnel s'étend de 1991 à 2010.

Le modèle est lancé une fois par mois, et fournit une prévision à 7 mois d'échéance. La simulation de mars est utilisée pour la prévision de mai à septembre, celle d'avril pour la prévision de mai à octobre, celle de mai pour la prévision de juin à octobre et celle de juin pour la prévision de juillet à octobre.

Adaptation locale de la prévision ARPEGE

La résolution horizontale du modèle est d'approximativement 2.5°. Une adaptation locale est donc nécessaire. L'approche choisie est une simple adaptation statistique de la prévision grande échelle, s'appuyant sur les prévisions de précipitations des 4 points de grille entourant la zone d'étude (ces points sont les mieux corrélés avec la série de données de Nouna).

Concrètement, la prévision utilisée est la moyenne mensuelle du cumul des précipitations des quatre points. On utilise la moyenne des 11 membres de l'expérience de référence (1983-2007) et les 41 membres de la période d'utilisation opérationnelle du modèle (2007-2011). On obtient une série de précipitations mensuelles pour la période 1983 à 2011 pour chacune des 4 initialisations présentée dans le Tableau 7.

Tableau 7 : Adaptation locale de la prévision ARPEGE - Dates d'initialisation et série déterministe

Date d'initialisation	Série déterministe
Mars - 03	mai à septembre 1983,....., mai à septembre 2011
Avril - 04	mai à octobre 1983,....., mai à octobre 2011
Mai - 05	juin à octobre 1983,....., juin à octobre 2011
Juin - 06	juillet à octobre 1983,....., juillet à octobre 2011

Plutôt que de prévoir le cumul des précipitations mensuel puis le dépassement du seuil de 80 mm, on choisit une adaptation par régression logistique pour prévoir directement la probabilité du dépassement du seuil.

Compte-tenu de la variabilité saisonnière importante des cumuls de précipitations et de l'influence des facteurs climatiques identifiés précédemment, les prédicteurs suivants sont introduits :

- Month : le mois concerné par la prévision (variable factorielle)
- AMO : la valeur de l'indice AMO <http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/correlation/amon.us.data>
- NAO a valeur de l'indice NAO <http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/correlation/nao.data>
- SIMU : la prévision ARPEGE (définie ci-dessus)

Un décalage de 6 mois a été employé pour les indexes AMO et NAO. Ce décalage, nécessaire pour une utilisation opérationnelle de ces indices, est le décalage le plus optimal en termes de corrélation avec les précipitations de la zone de Nouna. A noter que l'AMO a été introduite comme prédicteur du fait de l'absence de variabilité basse fréquence dans la prévision ARPEGE, plus précisément la distribution des cumuls saisonniers de précipitations prévues n'est pas influencée par le signe de l'AMO.

Les différents modèles présentés dans le Tableau 8 ont donc été testés :

Tableau 8 : Les différents modèles testés et leurs prédicteurs

Modèle 1	dep_seuil ~ simu + amo + month
Modèle 2	dep_seuil ~ simu + amo + nao + month
Modèle 3	dep_seuil ~ simu + nao + month
Modèle 4	dep_seuil ~ simu + amo + nao
Modèle 5	dep_seuil ~ simu + nao
Modèle 6	dep_seuil ~ simu + amo

Le calage et la validation des modèles statistiques s'effectuent par validation croisée. L'échantillon de 29 années est scindé en 10 sous-échantillons : 9 de 3 ans et 1 de 2 ans. En excluant le sous-échantillon 1, chacun des modèles est calé sur le reste des données et la prévision calculée pour le sous-échantillon 1. Cette opération est répétée en excluant successivement chacun des échantillons.

5.2.3.4. Evaluation des performances des systèmes de prévision

Pour pouvoir inter-comparer les modèles utilisant les prévisions ARPEGE aux deux approches (climatologie ou climatologie décomposée selon les phases de l'AMO) détaillées précédemment, un découpage des climatologies permettant de couvrir les mêmes périodes que celles des quatre initialisations a été effectuée, puis les courbes Receiver Operating Characteristics ou ROC (cf. Figure 30) et la valeur ROC (détaillé dans le Tableau 9) ont été calculées.

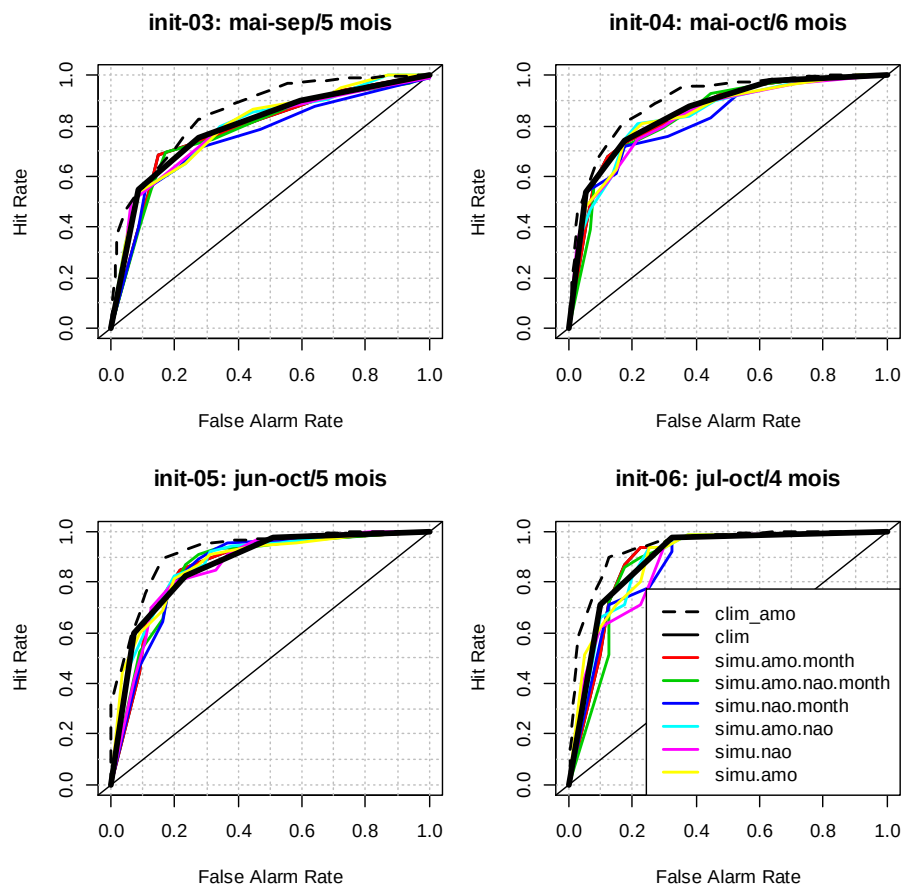


Figure 30 : Courbe ROC des prévisions en fonction du mois d'initialisation.

Tableau 9 : Aires sous la courbe ROC des prévisions en fonction du mois d'initialisation

modèle	3	4	5	6
clim_amo	0.86	0.90	0.92	0.94
clim	0.80	0.86	0.87	0.89
simu+amo+month	0.78	0.85	0.86	0.87
simu+amo+nao+month	0.77	0.84	0.86	0.87
simu+nao+month	0.74	0.81	0.85	0.84
simu+amo+nao	0.80	0.84	0.88	0.88
simu+nao	0.78	0.83	0.86	0.86
simu+amo	0.80	0.84	0.87	0.88

D'un point de vue global, quel que soit le mois d'initialisation, la meilleure prévision (selon la valeur de l'aire sous la courbe ROC) est celle utilisant la climatologie décomposée selon les phases de l'AMO. Les modèles utilisant ARPEGE tendent à égaler la climatologie mais (sauf pour le modèle simu+amo+nao initialisé en mai) ils ne la surpassent pas.

En conclusion, la prévision du dépassement du seuil de 80 mm mensuel sur la zone de Nouna donne de bons résultats avec une méthode simple, basée sur la connaissance de la climatologie décomposée selon les phases de l'AMO. L'introduction des prévisions ARPEGE dans un modèle statistique simple n'a pas été concluante, les résultats sont bons mais en deçà de ceux obtenus par la méthode climatologique.

Ce résultat peut paraître surprenant et peu flatteur pour les modèles climatiques de prévision saisonnière. Il est en fait assez logique compte-tenu du prédictand visé, qui est très bien discriminé climatologiquement. Avec un prédictand plus « classique » (précipitations cumulées sur la saison ou risque de dépassement d'un tercile saisonnier), où la climatologie aurait été moins discriminante, les conclusions auraient pu être différentes. On peut également supposer qu'une adaptation statistique plus évoluée aurait peut-être pu permettre de gagner en efficacité.

5.2.4. La vulnérabilité climatique future de la région de Nouna au paludisme

On s'intéresse, dans cette section, à la future vulnérabilité au paludisme (en termes de conditions climatiques favorables) de la région de Nouna.

5.2.4.1. Les scénarios climatiques

Pour cette évaluation, des simulations effectuées dans le cadre de l'exercice de simulations du climat futur à l'échelle globale CMIP-5 ont été employées. L'exercice CMIP-5 a fourni les informations nécessaires pour le dernier rapport du GIEC. Comparées aux exercices précédents, CMIP-5 présente des innovations significatives dans l'approche employée (Taylor et al., 2012). En effet, pour faciliter la prise en compte de l'impact des politiques de réductions des émissions de gaz à effet de serre, les modélisateurs du climat et les économistes ont travaillé de concert, les premiers sur les projections climatiques et les seconds sur les scénarios socio-économiques résultant de ces projections. Plus de 300 projections appelées RCP (Representative Concentration Pathway) ont été produites, quatre RCP de référence ont été retenues dans le cadre de l'exercice CMIP-5. Comme, le montre la Figure 31, trois de ces RCP sont comparables aux scénarios employés dans les anciens rapports du GIEC.

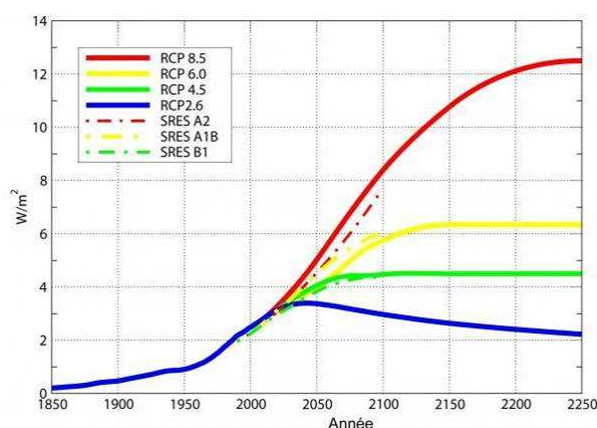


Figure 31 : Evolution du bilan radiatif de la terre, en Wm^{-2} sur la période 1850-2250. Après 2006, les traits continus représentent les nouveaux scénarios et les traits pointillés les anciens scénarios (GIEC, 2001 et 2007). Figure créée par Stéphane Senesi (CNRM-GAME, Météo-France/CNRS).

Dans le cadre du projet PALUCLIM, l'analyse s'est focalisée sur les scénarios RCP45 et RCP85. Le RCP45 prévoit un forçage radiatif de $4.5 W.m^{-2}$ en 2100, une concentration de 660 $eqCO_2$ au niveau de stabilisation après 2100 avec une trajectoire de stabilisation sans dépassement. Le RCP85, quant à lui, prévoit plus de $8.5 W.m^{-2}$ de forçage radiatif après 2100, plus de 1370 $eqCO_2$ en 2100 et une trajectoire croissante. On remarquera que ce dernier scénario RCP85 est plus pessimiste que SRES A2 qui était le pire scénario des anciens rapports du GIEC.

Une approche multi-modèle sans pondération a été employée pour évaluer la vulnérabilité future au paludisme de la région de Nouna. Pour les précipitations 8 modèles ont été employés et 6 pour les températures (problème de disponibilité des données de température de surface minimales et maximales pour deux des modèles : INM-CM4 et IPSL-CM5A-LR). Les modèles employés sont les suivants :

CCCMA-CanESM2, CNRM-CM5, Hadgem2-ES, INM-CM4, IPSL-CM5A-LR, IPSL-CM5A-MR, MIROC5 et NCC (voir Taylor et al., 2012 pour plus de détails). La résolution de ces modèles est d'approximativement 2.5°, les quatre points entourant la zone de Nouna ont été employés pour obtenir la variabilité des précipitations et températures minimales et maximales de cette région.

Une seule simulation a été employée par modèle, ce qui fait que les incertitudes associées à la variabilité climatique interne de chaque modèle ne sont pas prises en compte dans les résultats. En revanche, l'approche multi-modèle permet d'évaluer le panel des possibilités d'évolution des conditions favorables au développement du paludisme (Knutti et al., 2010).

5.2.4.2. Les scénarios climatiques sur la période passée

Une première phase a consisté à ajuster individuellement les données de modèles aux observations par une méthode quantile-quantile en utilisant les simulations historiques. Cet ajustement a été effectué sur la période commune aux simulations historiques et observations, soit 1983 à 2005. Les données ajustées de chacun des modèles ont ensuite été converties en indices IND de risque palustre.

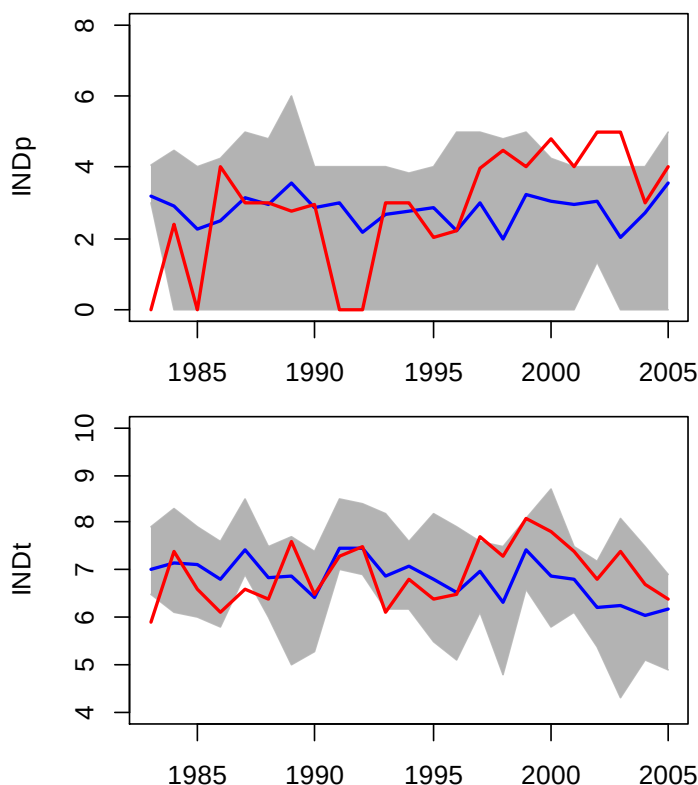


Figure 32 : Evolution de l'indice pour les précipitations INDp (haut) et les températures INDt (bas) sur la période historique après ajustement quantile-quantile pour les données simulées. En rouge, les observations de Nouna, en bleue la moyenne des simulations historiques, en gris la dispersion des modèles autour de la moyenne.

La Figure 32 montre la capacité des modèles à reproduire (après ajustement quantile-quantile) la valeur de l'indice de risque pour les précipitations et les températures. L'ensemble multi-modèle présente une très forte dispersion en ce qui concerne les précipitations INDp et malgré cette dispersion, les valeurs de l'indice observé sortent de la zone des possibles simulés pendant la phase positive de l'AMO soit post-1995. Cela suggère une sous-estimation des pluies ou des saisons des pluies simulées trop courtes. En ce qui concerne les températures INDt, la moyenne des indices simulées et les observations présentent une bonne cohérence.

L'absence d'un signal lié à l'AMO est encore plus flagrante lorsque l'on trace les densités de probabilité des indices INDp selon les phases de l'AMO (cf. Figure 33). Cette variabilité naturelle basse fréquence est donc visiblement absente (ou trop faible) dans les simulations climatiques passées, elle est à considérer lors de l'exploitation des résultats des projections futures.

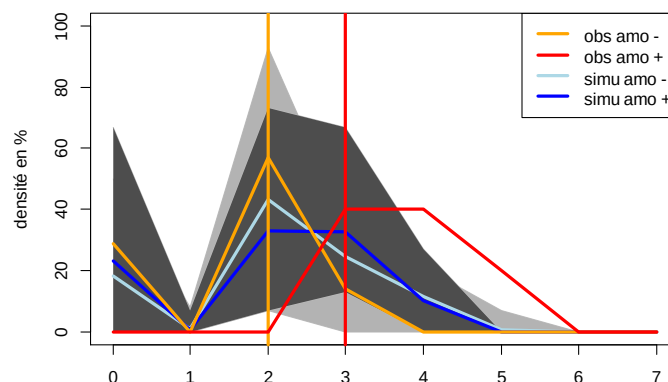


Figure 33 : Courbe de densité de probabilité de l'indice INDp pour la période 1983-2005 avec prise en compte de l'influence de l'AMO. En rouge (orange) courbe des observations correspondant aux années où l'AMO est dans une phase positive (négative). En bleu foncé (clair) courbe de la moyenne des simulations correspondant aux années où l'AMO est dans une phase positive (négative). La zone en gris foncé (clair) correspond à la dispersion autour de la moyenne simulée lors des phases positive (négative) de l'AMO.

5.2.4.3. Evolutions du climat et du risque palustre

La moyenne (et la dispersion qui l'accompagne) de l'indice de risque palustre de l'ensemble multi-modèle est présenté dans la Figure 34 pour la période 1983 à 2100 pour les précipitations (pr – colonne de gauche) et température (tp – colonne de droite), pour les projections rcp45 (haut) et rcp85 (bas). La couleur bleue (bleue claire) indique les périodes plus (moins) favorables par rapport à la moyenne sur la période historique (1983-2005). Noter que les résultats jusqu'en 2005 (période historique rectangle noir) sont évidemment les mêmes pour les deux scénarios pour chacun des deux paramètres.

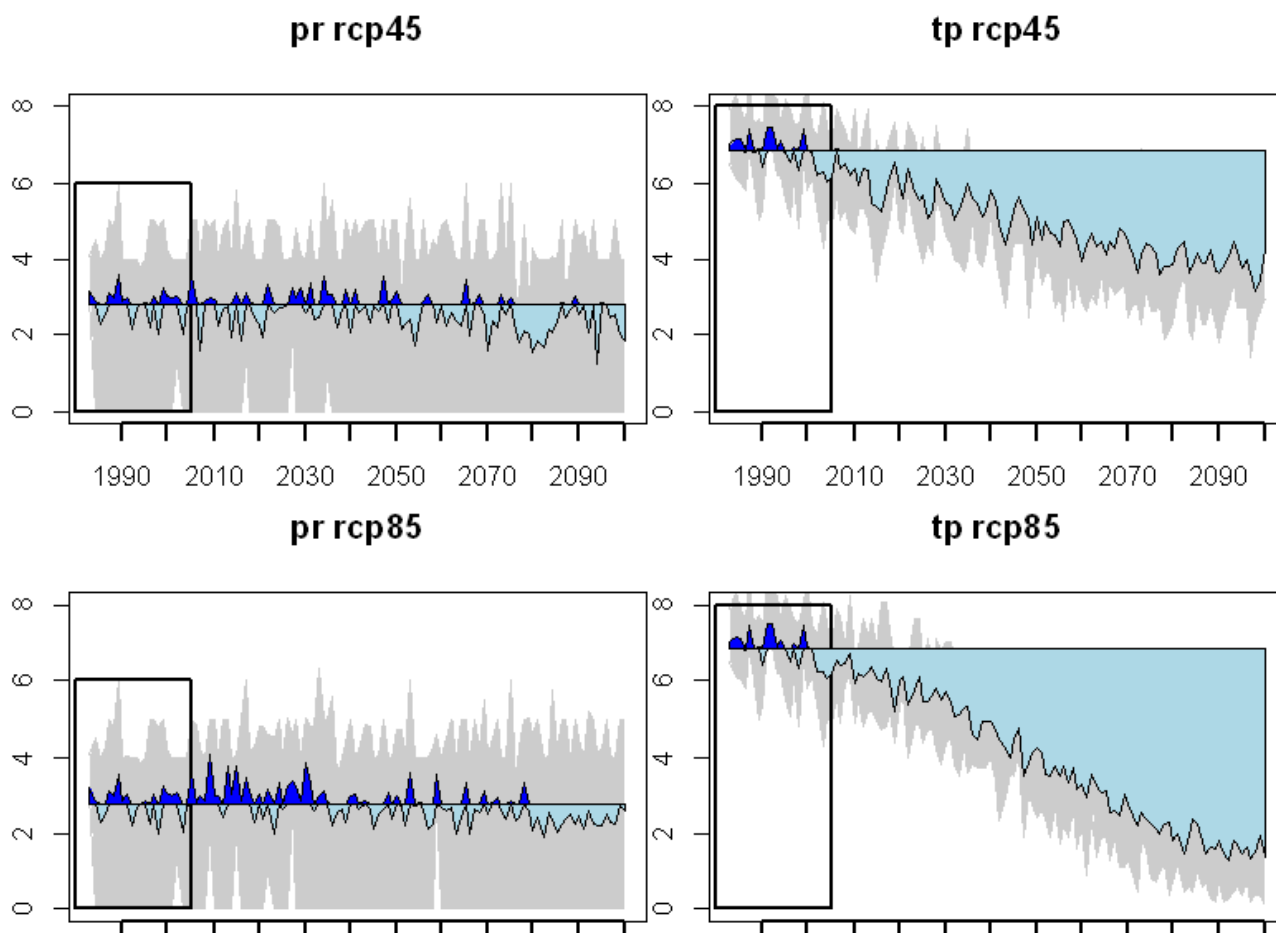


Figure 34 : Evolution moyenne (et dispersion qui l'accompagne) de la valeur annuelle de l'indice des conditions favorables de précipitation INDp (gauche) et de température INDt (droite) au développement du paludisme de 1983 à

2100. Post-2005, les évolutions sont le résultat du scénario de changement climatique rcp45 (haut) et rcp85 (bas). Les parties bleues (bleue claire) des courbes sont pour les périodes au-dessus (en-dessous) de la moyenne qui a été calculé sur la période historique 1983 à 2005. Voir les définitions des 'Representative Concentration Pathways' rcp45 et rcp85 sur le site : <http://www.pik-potsdam.de/~mmalte/rcps/>

La Figure 34 permet d'estimer l'amplitude et la variabilité autour de la moyenne de la période d'étude ainsi que la présence potentiel d'une tendance. On note ainsi une forte variabilité interannuelle pour l'indice lié aux précipitations (INDp) et une tendance légère, post 2040, à des conditions plus défavorables que pendant la période historique. En revanche, avant 2040, le scénario rcp85 semble présenter des épisodes de conditions plus favorables plus fréquemment que le rcp45. Cependant, compte tenu de très forte dispersion autour de la moyenne de l'INDp, l'interprétation donnée pour ce paramètre ne peut être considéré comme très significative.

A l'inverse, en ce qui concerne les indices de températures (INDt), la tendance à la baisse est très prononcée, indiquant des conditions climatiques de plus en plus défavorables au développement du paludisme dans la région de Nouna. Cette forte tendance s'explique par l'évolution de la température maximale annuelle moyenne.

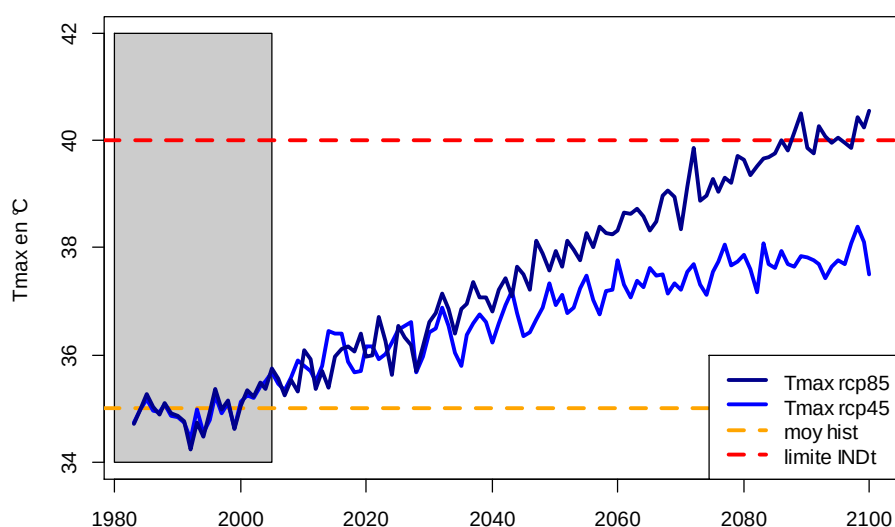


Figure 35 : Evolution de la température maximale moyenne annuelle et pour l'ensemble multi-modèles. Jusqu'en 2005 l'évolution est commune puis les températures évoluent en fonction des scénarios rcp45 et rcp85.

Cette évolution est présentée dans la Figure 35, avec en orange la moyenne sur la période historique (1983-2005) et en rouge la limite de température, au-delà de laquelle les conditions deviennent défavorables, selon le modèle de Craig. Le scénario rcp45 (bleu) simule une augmentation de la moyenne des températures maximales annuelles sur la région de Nouna d'approximativement 3°C et le scénario rcp85 (bleu foncé) de plus de 5°C. Ce réchauffement, à l'échelle intra-annuelle, rapproche de plus en plus souvent les températures de la limite supérieure de 40 °C et explique ainsi la chute progressive de la valeur de l'indice INDt.

5.2.4.4. Evolutions du risque palustre par périodes de 30 ans

Pour faciliter l'exploitation des résultats, on représente les projections climatiques sous forme synthétique, par des densités de probabilité des indices de risques palustre par périodes de 30 ans.

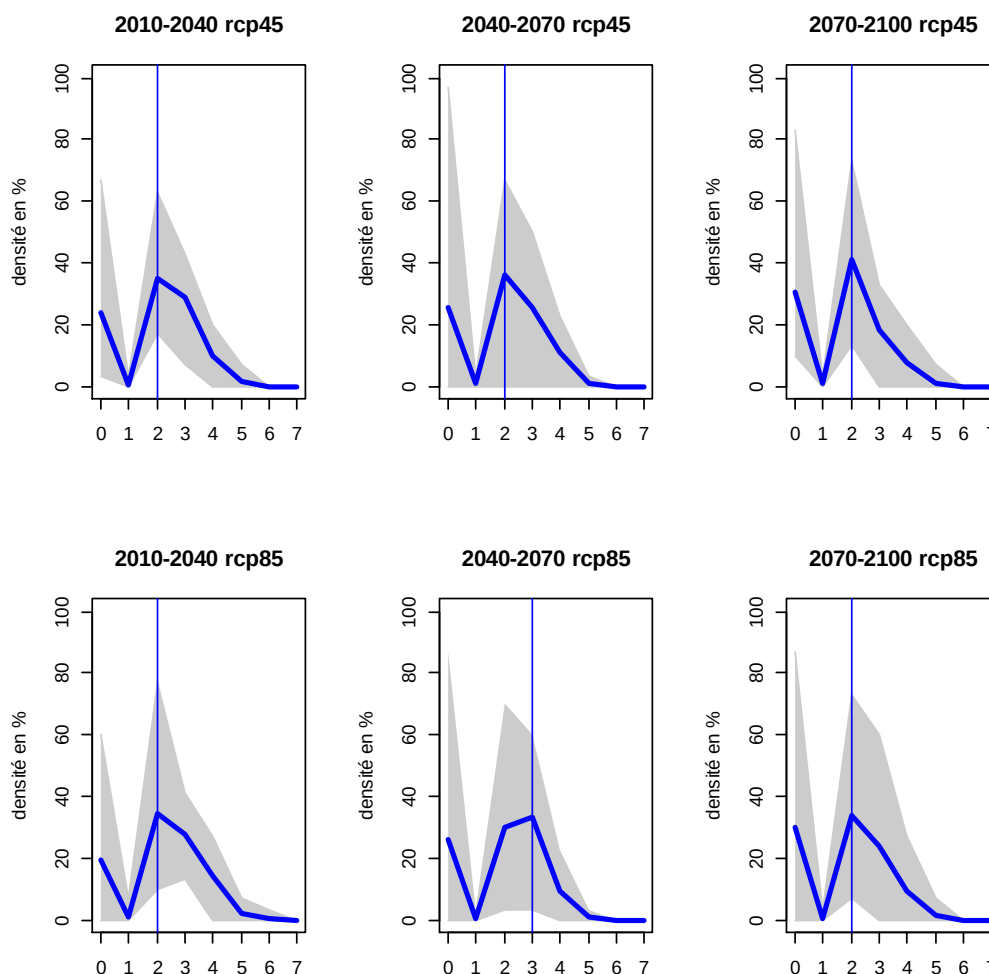


Figure 36 - Courbes de densité de probabilité de l'indice INDp pour les périodes 2010-2040 / 2040-2070 / 2070-2100 pour les scénarios rcp45 (haut) et rcp85 (bas). L'axe des abscisses indique les valeurs de l'indice INDp. En bleu foncé courbe de la moyenne des simulations et la zone en gris foncé correspond à la dispersion autour de la moyenne simulée.

Sur la Figure 36, on ne distingue pas de réelle évolution du risque lié aux précipitations. Les distributions s'apparentent à celle de la période 1983-2005 (cf. Figure 33). On rappelle toutefois que de la variabilité naturelle peut moduler ce signal, comme l'a fait l'AMO sur la période 1983-2005. Cependant, sur la région de Nouna, la tendance climatique (hors variabilité naturelle) ne semble pas conduire à des modifications suffisamment importantes des précipitations pour que l'indice de risque augmente ou baisse significativement.

Concernant la température, la Figure 37 montre pour la période 2010-2040 des conditions déjà moins favorables que celles rencontrées pendant la période historique avec le pic pour une valeur d'indice de 5. En moyenne, le scénario rcp45 ne semble pas entraîner de changement majeur avant la période 2070-2100 où les conditions de températures limitent fortement le risque palustre. En revanche, le scénario rcp85 entraîne des changements majeurs dès la période 2040-2070 avec un pic de valeur d'indice à 3. Quant à la période 2070-2100 les conditions de température font tomber l'indice très bas, avec un pic à 1.

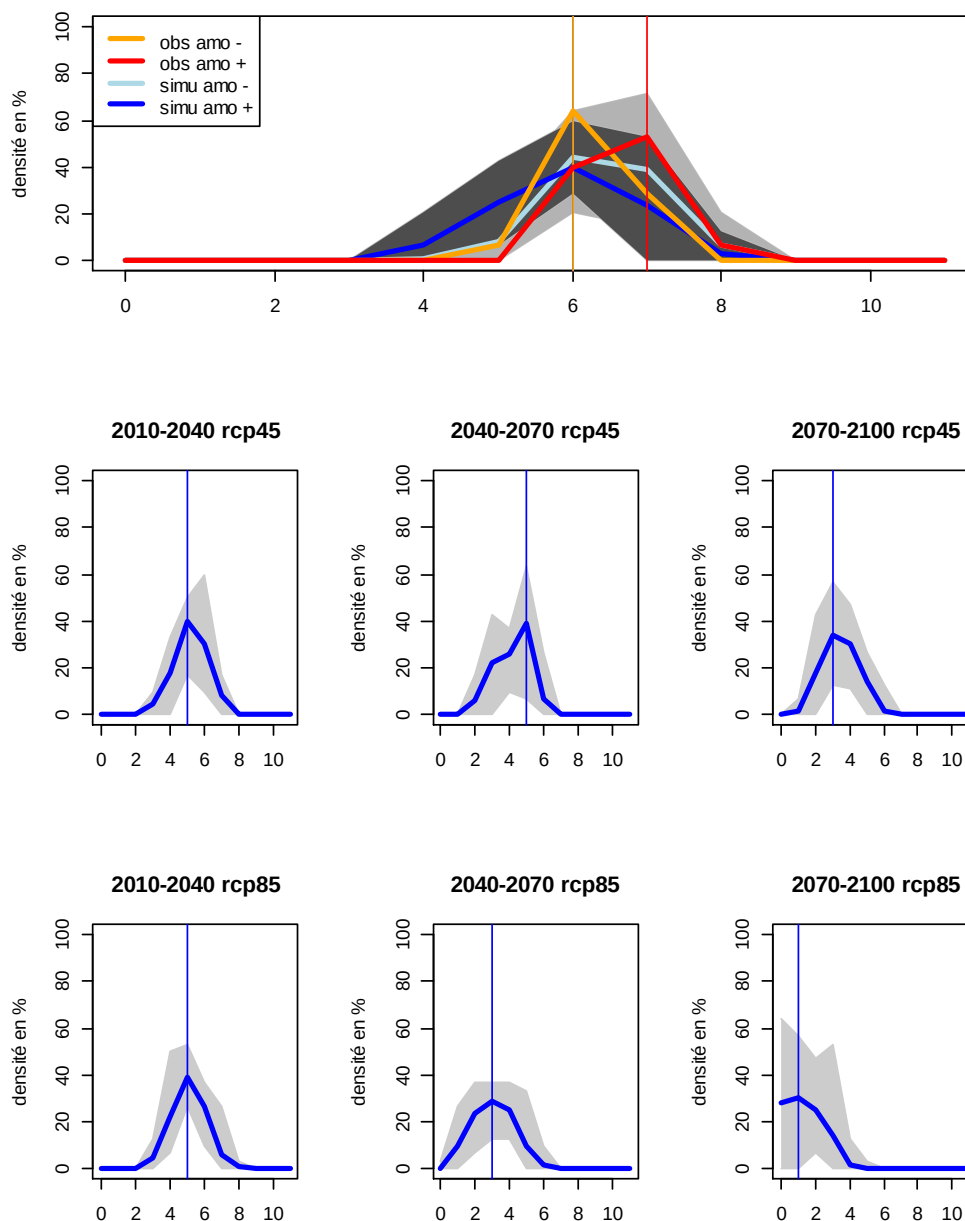


Figure 37 : Courbe de densité de probabilité de l'indice INDt pour la période historique (haut, voir Figure 33 pour les détails) et pour les périodes 2010-2040 / 2040-2070 / 2070-2100 pour les scénarios rcp45 (milieu) et rcp85 (bas) voir Figure 36 pour les détails.

5.2.4.5. Synthèse de l'évolution du risque palustre

Au cours de la période historique, selon le modèle de Craig, les conditions favorables ou défavorables au paludisme étaient principalement pilotées par les précipitations, qui elles-mêmes étaient très influencées par la phase de l'AMO. Les conditions de température étaient quant à elles favorables tout au long de la saison des pluies.

Selon les projections climatiques pour le 21^{ème} siècle (et les résultats préliminaires et globaux de CORDEX <http://cordex2013.wcrp-climate.org/>), le contexte devrait très sensiblement évoluer. Le changement ne devrait pas concerner le risque lié aux précipitations, où les variations naturelles du climat semblent plus fortes que la tendance climatique simulée. En revanche, le risque lié aux températures devrait être beaucoup plus impacté : l'augmentation des températures devrait conduire à une réduction notable du risque. Par conséquent, selon le modèle de Craig, l'élévation de la température deviendrait le facteur limitant pour le risque palustre sur la région de Nouna, allant jusqu'à le réduire très fortement en fin de siècle par rapport à son niveau actuel.

6. PRODUCTION DES CARTES DE RISQUE ENTOMOLOGIQUE

Une première étape de la prévision du risque de maladie consiste à identifier les zones de prolifération des vecteurs car, même si les relations entre les densités de vecteurs et la prévalence des maladies ne sont pas forcément linéaires, il est certain que sans vecteurs, il n'y pas de risque de paludisme. La cartographie du risque d'infection peut donc se baser dans un premier temps sur l'évaluation environnementale du risque entomologique. Il est ensuite modulé par les caractéristiques des populations humaines exposées aux piqûres et fournissant le réservoir de parasites (immunité acquise, contact homme-vecteur, accès aux soins...). La télédétection fournit dans ce cadre un apport pour la cartographie des zones favorables au développement et à la survie des moustiques et l'obtention de données géo-climatiques.

Dans le présent projet, trois étapes de cartographie du risque entomologique ont été suivies : i) cartes des collections d'eau, sans référence à la présence ou pas de larves d'anophèles, ii) cartes des gîtes larvaires, qui ajoute à la carte précédente la notion de présence et de densité larvaire et iii) cartes de densité des vecteurs adultes, qui découle de la carte ii et de la dispersion des moustiques à partir de leur gîte d'émergence. Cette méthodologie est inspirée des travaux effectués à Dakar pour la cartographie du risque entomologique de paludisme en milieu urbain (Machault et al. 2012), ainsi que d'un travail préliminaire à ce projet dans la région de Nouna (Dambach et al. 2012).

A chaque étape, les cartes proviennent de l'application des modèles statistiques ayant mis en évidence les facteurs de risque environnementaux et météorologiques de i) la présence d'eau, ii) la présence et la densité de larves et iii) la densité de vecteurs.

6.1. DONNÉES ET SYSTÈME D'INFORMATION GÉOGRAHIQUE

6.1.1. Données satellites

Les scènes SPOT-5 du 17/02/2012 (saison sèche) et du 24/09/2011 (saison humide, contemporaine aux prospections de terrain) ont été utilisées pour ce travail de cartographie. Chaque scène comportait deux images : une image à 2,5m de résolution spatiale de 3 bandes spectrales (vert, rouge et proche infrarouge - PIR) et une image à 10m de résolution spatiale de 4 bandes spectrales (3 bandes identiques à l'images de 2,5m + moyen infrarouge - MIR). Leur emprise couvrait 8 des 10 villages de la zone d'étude : Biron Marka, Cisse, Goni, Kamadena, Kansara, Konkuini, Labarani, Tissi (cf. Figure 38).

Le modèle numérique de terrain SRTM (Shuttle Radar Topography Mission - SRTM) a aussi été utilisé.

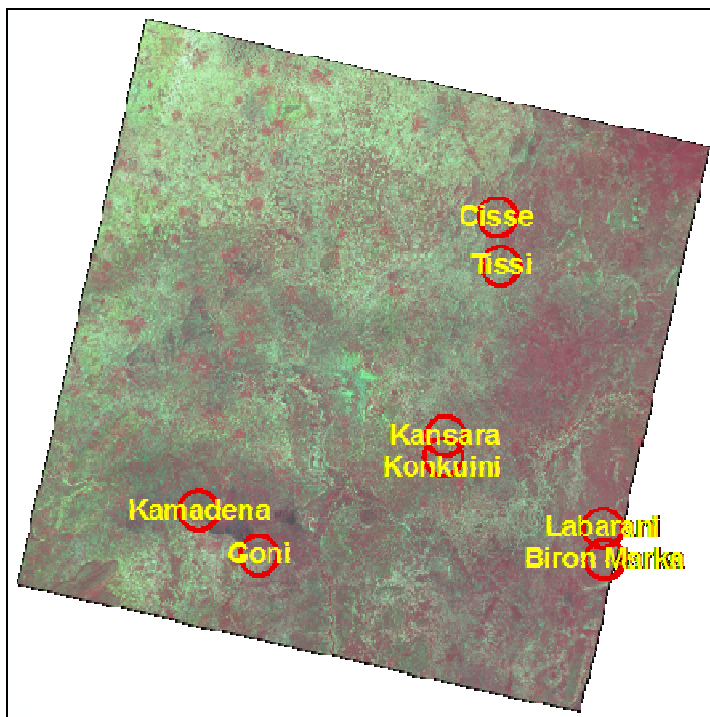


Figure 38: Villages d'études (8) représentés sur une image satellite SPOT-5 (@CNES 2011, distribution Astrium GeoInformation Services)

6.1.2. Traitement des images

Tous les traitements d'images ont été effectués avec le logiciel de traitement d'images ENVI 4.8 (Excelis Visual Information Solutions). Un masque a été créé afin d'extraire une zone de 2km autour de chaque village.

Pour les deux paires d'images, la bande MIR a été ré-échantillonnée à 2,5m afin d'être empilée à l'image à 2,5m. Deux images à quatre bandes étaient ainsi générées à 2,5m de résolution spatiale.

6.1.2.1. Calcul d'indices

Pour chaque image à 4 bandes (2,5m), plusieurs indicateurs de végétation, d'humidité et de sols ont été calculés par des opérations mathématiques simples entre bandes, afin de mettre en évidence ces caractéristiques du terrain (cf. Tableau 2).

6.1.2.2. Classification LULC (Land Use and Land Cover)

La classification supervisée basée sur la méthode du maximum de vraisemblance permet d'affecter chaque pixel d'une image à une des classes identifiées grâce à des parcelles d'entraînement, via un algorithme probabiliste (théorie de Bayes).

Une telle classification a été effectuée sur l'image de saison humide, permettant de générer une carte d'occupation et d'utilisation du sol dans la zone d'étude. Des parcelles d'entraînement ont été numérisées lors de la campagne de terrain spécialement organisée au début de la saison humide 2011 (cf. paragraphe 3.2). Dix classes ont été définies comme suit, afin de représenter les différents écosystèmes autour des villages d'étude : sol nu, bâti, champ cultivé, champ cultivé avec végétation éparse, champ cultivé humide, forêt, rizière inondée, sable, eau contenant de la végétation, eau libre (cf. Figure 39).

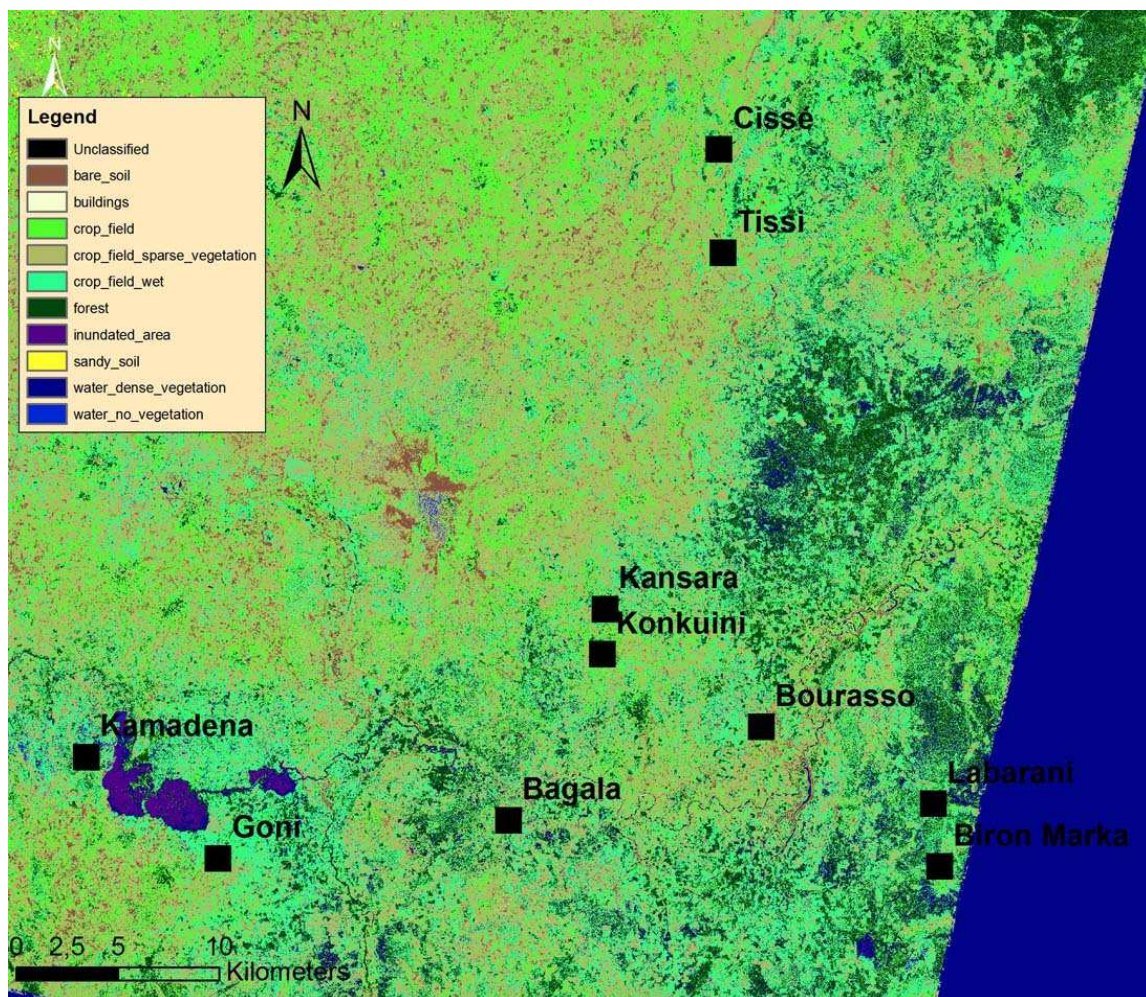


Figure 39: Carte d'occupation du sol générée à partir de la classification supervisée de l'image SPOT-5 du 24/09/2011

Une matrice de confusion a été calculée afin de juger de la qualité de la classification. A partir de cette matrice de confusion, il a été possible de calculer différents critères permettant de mesurer l'exactitude de la classification. Les résultats sont présentés dans le tableau 11.

- **User Accuracy** (Précision pour l'utilisateur) : représente le pourcentage de pixels bien classés par rapport au nombre total de pixels de la classe (valeurs de la diagonale). Plus ce rapport, exprimé en pourcentage, est proche de 100, meilleur est le résultat. Il est généralement admis que cet indice est satisfaisant lorsqu'il dépasse 60%.
- **Producer Accuracy** (Précision pour le réalisateur) : correspond au pourcentage de pixels issus des classes des parcelles de contrôle dans les images classées. Il s'obtient en calculant le rapport du nombre total de pixels affectés à une classe sur le nombre total de pixels présents effectivement dans cette classe d'après les données de terrain. Cet indice, exprimé en pourcentage, permet de savoir si une classe est surestimée (>100%) ou sous-estimée (<100%).
- **Omission Error** (Erreur d'omission) : correspond aux pixels attribués à d'autres classes que celle considérée et à laquelle ils appartiennent d'après les enquêtes de terrain. En pratique, il se calcule en prenant le complément à un de la précision pour l'utilisateur.
- **Commission Error** (Erreur de commission) : porte sur les pixels affectés à une classe alors qu'en réalité ils ont été identifiés comme appartenant à une autre classe. Il se calcule en prenant le complément à un du rapport entre le nombre de pixels bien classés (user accuracy) dans la classe considérée sur le nombre total de pixels affectés par l'algorithme dans cette même classe.

Les critères d'évaluation de qualité ont été calculés pour la classification réalisée à partir de l'image 24/09/2011. L'analyse de ces critères présentés dans le Tableau 10 montre que la qualité de la classification peut être considérée comme satisfaisante à l'exception de la classe « water dense vegetation » qui n'est pas bien reconnue et de la classe « crop field » qui est nettement sous-estimée.

Tableau 10 : Critères d'évaluation de la classification

Land cover class	Producer's accuracy (in %)	Commission error (in %)	User's accuracy (in %)	Omission errors (in %)
bare soil	98,27	0,51	99,49	1,73
buildings	98,16	29,87	70,13	1,84
crop field	55,78	39,95	60,05	44,22
crop field sparse vegetation	97,44	2,45	97,55	2,56
crop field wet	79,35	31,83	68,17	20,65
forest	91,72	7,29	92,71	8,28
inundated area, rice field	95,14	0,09	99,91	4,86
sandy soil	98,16	0,01	99,99	1,84
water dense vegetation	82,15	76,7	23,3	17,85
water no vegetation	96,49	14,76	85,24	3,51

6.1.3. Données météorologiques

Les données météorologiques correspondant aux dates des prospections entomologiques ont été extraites du jeu de données décrit dans les paragraphes précédents, pour chaque village étudié. Pour la pluviométrie, des variables de cumul ont été construites, de façon à prendre en compte les événements passés, sous forme de cumul des précipitations sur 1 semaine, 2 semaines et 1 mois.

6.1.4. Système d'Information Géographique

Pour mettre en œuvre ces étapes de cartographie du risque entomologique, un SIG a été créé sous ArcGIS 9.3 (Esri France). Il a permis de réunir sous un même système de coordonnées géographiques :

- Les données entomologiques géo-référencées.
- Les données environnementales issues des traitements des images satellites.

Les couches d'information ont été ajoutées comme suit. Un extrait du SIG est présenté en figure 28.

1) Images SPOT-5 de saison sèche et de saison humide.

- 2) Images raster de tous les indices calculés aux deux dates (saison sèche et saison humide).
- 3) Image raster de la classification LULC de l'image de saison humide.
- 4) Modèle Numérique de Terrain (altitude)
- 5) Couche vecteur des zones prospectées dans les villages (3 zones par village, en jaune sur la figure 28).
- 6) Grille de carrés de 10 m de côté couvrant la totalité des zones prospectées (3 zones par village).
- 7) Couche vecteur de toutes les collections d'eau relevées sur le terrain (contour maximum des collections, en noir sur la Figure 40).
- 8) Points correspondant aux pièges posés dans les villages.



Figure 40: Extrait du SIG pour le village de Goni.

Pour chaque collection d'eau référencée au sol et chaque point de capture de moustiques, le SIG a permis d'extraire une série d'informations environnementales issues des indices et de la classification du couvert et de l'utilisation du sol, à différentes échelles.

Une base de données a ainsi été générée en juxtaposant l'information entomologique à cette information environnementale extraite des images. En plus de cela, les données météorologiques ont été jointes à la base de données, sur la base de la date de recueil des données entomologiques dans les villages.

Ce sont les données de cette base qui ont été utilisées pour les analyses statistiques détaillées ci-dessous.

6.2. CARTOGRAPHIE DES COLLECTIONS D'EAU

6.2.1. Méthode

L'objectif de cette étape était d'ajuster un modèle statistique pour rechercher les facteurs environnementaux de la présence d'eau au sol. L'unité expérimentale a été choisie à ce niveau comme un carré de 10m. La présence d'eau a donc été recherchée à cette échelle, qui a été jugée comme étant un bon compromis entre la résolution de détection, le nombre d'unités à analyser - duquel dépend les temps de calcul des modèles - et la taille réelle des collections d'eau au sol. A ce stade, la présence ou pas de larves d'anophèles n'a pas été prise en compte. Le modèle final issu de cette analyse a ensuite été inversé pour créer la carte de prédiction des collections d'eau dans les villages de la zone d'étude.

Dans le SIG, la valeur 0 ou 1 a été affectée à chaque carré de la grille de 10m, selon la présence ou l'absence d'eau. Si un carré était superposé à une collection d'eau, même pour une petite surface, la valeur du carré était affectée à 1. Cela permettait de prendre en compte les petites collections d'eau,

Toutes ces variables ont ensuite été transférées dans Stata 11 (Stata Corporation, College Station, Texas) pour l'analyse statistique.

La variable à expliquer étant une variable 0/1 (absence/présence d'eau dans les carrés de 10m), des régressions logistiques ont été utilisées pour rechercher les variables environnementales significativement associées à la présence d'eau. Le schéma de collecte de données pouvait impliquer l'existence d'autocorrélations spatiales entre les observations faites dans un même village. En effet, les observations proches ont plus de chances de se ressembler que les observations lointaines car elles peuvent être influencées par un même environnement. Si cet environnement n'est pas complètement pris en compte dans les variables explicatives, alors la force des associations statistiques peut être surestimée. Ainsi, un effet aléatoire a été ajouté au niveau du village pour prendre en compte ces éventuelles autocorrélations spatiales.

Le pouvoir discriminant du modèle final a été évalué par le calcul de l'aire sous la courbe ROC (Receiving Operating Characteristics). L'examen visuel de la courbe ROC a permis de définir le seuil de probabilité au-delà duquel on considère la présence d'eau. La prédiction de la probabilité de présence d'eau au niveau de chaque carré de 10m de la zone de 2km autour des villages a été faite en inversant le modèle statistique final. L'application du seuil permettait de construire une image (raster) de la présence d'eau autour des villages, à une résolution spatiale de 10m.

Un filtre morphologique de fermeture (succession de l'application d'un filtre de dilatation puis d'érosion) de taille 3x3 pixels a été alors appliqué sur cette image permettant de lisser les contours et de combler les trous, tout en conservant les petites surfaces en eau. L'image lissée résultante a ensuite été vectorisée et chaque collection d'eau a ainsi été créée comme un seul et unique objet. En effet, pour l'étape suivante, les facteurs physico-chimiques associés à la présence de larves doivent se mesurer au niveau des collections d'eau car c'est à cette échelle qu'ils sont pertinents (ex : ombre portée sur une flaque d'eau, turbidité d'un marigot, végétation de surface dans un marécage...). Une évaluation de ces facteurs au niveau des pixels de 10x10m n'aurait pas eu de sens biologique.

Le résultat de l'analyse statistique est présenté dans le Tableau 11. Seules les variables associées significativement en analyse multivariée sont présentées. Chaque observation correspond à un carré de la grille de 10 m créée dans le SIG. Sur les 10 villages étudiés, seuls 8 étaient couverts par les images SPOT-5.

Tableau 11: Facteurs environnementaux associés significativement à la présence d'eau maximale dans les carrés de 10m. Régression logistique avec effet aléatoire au niveau village.

		Univarié			Multivarié		
11368 observations dans 8 villages	Coef	95% IC*	p-value		Coef	95% IC*	p-value
NDPI (image de saison humide)							
Par unité	-10,89	[-12,01;-9,78]	<0,001		-5,35	[-6,78;-3,92]	<0,001
NDWI McFeeters (image de saison							

humide)

Par unité	7,00	[6,13;7,86]	<0,001	1,61	[0,57;2,64]	0,002
-----------	------	-------------	--------	------	-------------	-------

Eau contenant de la végétation + eau libre (classification LULC)

Par m ²	0,04	[0,04;0,05]	<0,001	0,03	[0,03;0,04]	<0,001
--------------------	------	-------------	--------	------	-------------	--------

* Intervalle de confiance à 95%

L'aire sous la courbe ROC a été calculée à 0,73 [0,71 ; 0,75]. Les 2 indices NDPI et NDWI McFeeters étaient associés à la présence d'eau de façon cohérente car ils ont tous les deux des propriétés de mise en évidence de l'eau libre. La carte d'occupation du sol (classification LULC de l'image de saison humide) a aussi permis de fournir une variable permettant la détection de l'eau. Le coefficient du NDPI est négatif car cet indice diminue avec la présence d'eau. A l'inverse, le NDWI McFeeters augmente avec la présence d'eau et il est donc associé avec un signe positif. En utilisant ces 3 variables, le pouvoir discriminant du modèle était satisfaisant.

La carte des collections d'eau résultant de l'inversion du modèle à une résolution spatiale de 10 m (en cohérence avec l'unité d'étude à cette étape) et des étapes de filtrage et de vectorisation a été générée, menant à la création de 1581 collections d'eau au total, dans les zones de 2km de rayon autour des 10 villages (8 villages ayant servi à la construction du modèle + les 2 autres villages de la zone d'étude). La Figure 41 fournit un extrait de la prédiction pour le village de Goni (emprise identique à la Figure 40). On peut voir que les collections d'eau relevées sur le terrain (en noir) sont assez bien détectées par le modèle et qu'il y a peu de faux positifs au sein des zones prospectées (en jaune). Une validation systématique est présentée plus loin.

Selon les objectifs d'utilisation de la carte des collections d'eau, le seuil de détection de l'eau peut être ajusté, de façon à détecter une quantité plus ou moins importante de collections d'eau. Selon les cas, il peut être plus approprié d'abaisser le seuil, quitte à détecter des faux positifs, mais manquer le moins de vrais positifs possible ; ou d'augmenter le seuil de façon à ne conserver que les zones ayant une très forte probabilité d'être réellement en eau. La présente carte a été générée de façon à ne pas trop surestimer le nombre de collections d'eau car elle a servi de base de travail pour l'application du larvicide sur le terrain.

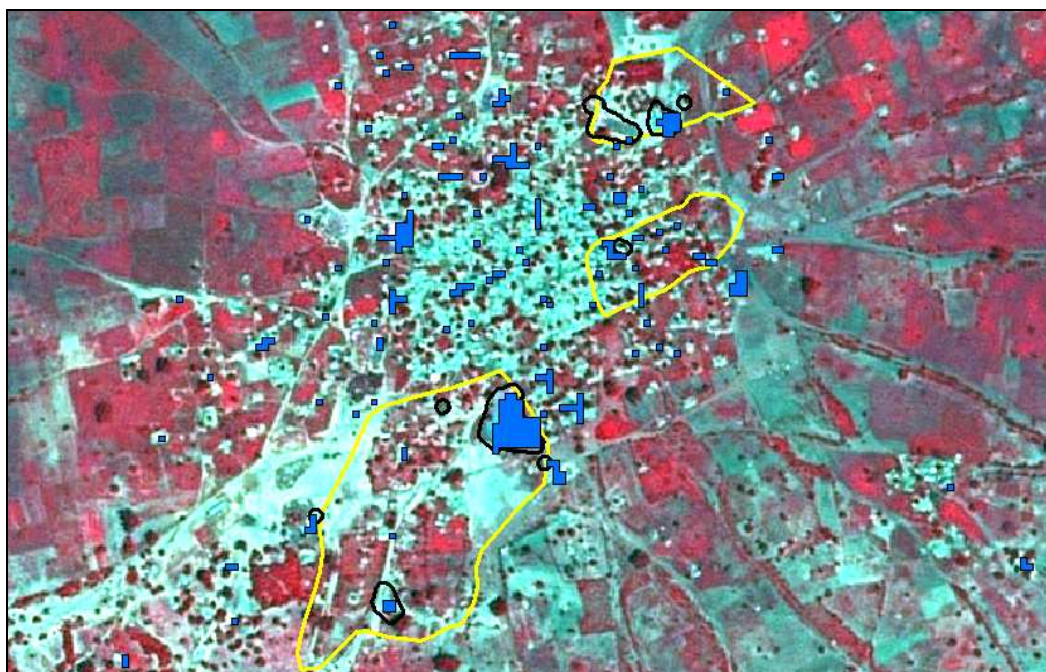


Figure 41: Résultats de la prédiction des collections d'eau (aires en bleu, étape 1).

Aucune variable météorologique n'était introduite dans le jeu de données. Il a été décidé de détecter la réalité de la présence d'eau au sol, et pas de modéliser la potentielle présence d'eau selon les

caractéristiques du terrain et les conditions météorologiques à un instant donné. La carte de prédiction des collections d'eau est donc une carte statique, basée sur une image de saison humide à une date donnée. On considère que la carte est donc valide pour l'année de l'image, voire pour quelques années postérieures, selon l'évolution de la zone en question.

6.3. CARTOGRAPHIE DES GITES LARVAIRES

6.3.1. Méthode

L'objectif de cette étape était d'ajuster un modèle statistique pour rechercher les facteurs environnementaux et météorologiques des densités larvaires mesurées au sol dans les collections d'eau. L'unité expérimentale a été choisie comme la collection d'eau augmentée d'un anneau de 10m. En effet, il est connu que l'environnement proche des collections d'eau a une influence sur la présence et/ou la densité de larves. Par exemple, l'ombre portée par la végétation se situant autour d'une flaque peut défavoriser le développement de certaines espèces d'anophèles qui préfèrent les gîtes ensoleillés. A l'inverse d'autres espèces peuvent avoir besoin de gîtes ayant une forte végétation de surface. La densité larvaire a donc été évaluée à cette échelle.

Dans le SIG, la moyenne de chaque indice (calculée à partir des images des 2 dates), ainsi que les surfaces de chaque classe de LULC ont été calculées dans les collections d'eau relevées au sol et numérisées, augmentées d'un anneau de 10m sur leur contour. La densité de larves d'anophèles par louches a été calculée à partir de la somme des 4 stades larvaires collectés + les nymphes, divisée par le nombre de louches prises lors des prospections de terrain.

Les données météorologiques correspondant aux dates des prospections entomologiques étaient aussi incluses dans la base de données (pluie du jour, cumul des pluies de la semaine précédente, cumul des pluies des 2 semaines précédentes, cumul des pluies du mois précédent, température du jour, humidité relative du jour). Pour l'ajustement du modèle, les données météorologiques contemporaines aux prospections de terrain ont été utilisées, avec une valeur propre à chacun des villages (cf. paragraphe 3.3). Pour la prédiction de la densité larvaire (carte utilisée par la suite pour la mise en place du traitement au Bti), les données du début de la saison des pluies 2012 ont été prises en compte. A la différence des données contemporaines aux prospections de terrain, elles sont basées uniquement sur les données RFE (données TRMM étant disponibles uniquement jusqu'au 30/04/2012).

Toutes ces variables ont alors été transférées dans Stata 11 pour l'analyse statistique.

La variable à expliquer étant une variable linéaire (densité larvaire dans une collection d'eau à une date donnée), des régressions linéaires ont été utilisées pour rechercher les variables environnementales et météorologiques significativement associées à la densité larvaire. De la même façon que pour l'étape précédente, le schéma de collecte de données pouvait impliquer l'existence d'autocorrélations spatiales entre les observations faites dans un même village. Ainsi, un effet aléatoire au niveau du village a aussi été ajouté.

Les variables associées à la densité larvaire avec une $p\text{-value} < 0,25$ en analyse univariée ont été retenues pour l'analyse multivariée. Une procédure de sélection backward stepwise a été utilisée pour sélectionner les variables. Seules les variables avec une $p\text{-value} < 0,05$ ont été conservées dans le modèle final.

L'équation linéaire issue du modèle final a été appliquée à toutes les collections d'eau prédites à l'étape précédente. Cela signifie que les variables statistiquement associées à la densité larvaire étaient calculées au niveau des collections d'eau de l'étape 1. Parmi elles, les variables environnementales étaient générées dans le SIG.

La qualité du modèle final a été évaluée en utilisant la corrélation de rang de Spearman, au niveau de chaque collection d'eau ayant été prospectées au sol. Toutes les densités mesurées ainsi que toutes les prédictions ont été sommées par collection d'eau, puis pondérées par le nombre de prospections par collection d'eau. La corrélation de rang était alors recherchée sur ces variables cumulatives. Le choix de la mesure de la corrélation de rang et non de la corrélation des valeurs elles-mêmes est justifié par l'objectif final de l'utilisation de la carte de risque des densités larvaires. En effet, la carte devait permettre de choisir un certain nombre de gîtes - les plus à risque - pour guider le protocole d'application du larvicide Bti. Ainsi, la valeur des densités larvaires n'était pas à prendre en compte en tant que telle, car seul le classement du risque des gîtes les uns par rapport aux autres était utilisé pour guider le choix des collections à traiter. De plus, la carte finale ne pouvait être qu'une image fixe du risque au début de la campagne de traitement larvicide avec le Bti.

6.3.2. Résultats/ Discussion

Le résultat de l'analyse statistique est présenté dans le Tableau 12. Seules les variables associées significativement en analyse multivariée sont présentées. Chaque observation correspond à une prospection d'une collection d'eau, à une date donnée. Lors du dépouillement des bases de données entomologiques et géographiques, seules les données des collections d'eau de 7 villages (contenus dans l'empreinte de l'image) ont pu être exploitées pour l'analyse.

Tableau 12: Facteurs environnementaux et météorologiques associés significativement aux densités larvaires d'anophèles dans les collections d'eau. Régression linéaire avec effet aléatoire au niveau collection d'eau.

		Univarié			Multivarié		
186 observations dans 7 villages	Coef	95% IC*	p-value	Coef	95% IC*	p-value	
NDWI McFeeters (image de saison humide)							
Par unité	19,93	[12,66;27,20]	<0,001	22,24	[14,37 ;30,12]	<0,001	
Cumul de pluie dans les 30 jours précédent la prospections							
Par mm	0,02	[0,00;0,03]	0,047	0,02	[0,01;0,04]	0,004	

* Intervalle de confiance à 95%

Le coefficient de corrélation de Spearman calculés pour les collections d'eau est de 0.40, indiquant une corrélation modérée.

Le NDWI McFeeters de la saison humide est associé positivement à la densité de larves. Son association avec la présence de larves d'anophèles a déjà été mise en évidence lors de la cartographie des gîtes larvaires à Dakar (Machault 2012) pour les 2 raisons suivantes :

- Il était lié aux collections d'eau temporaires, plus favorables à constituer des gîtes larvaires que des collections permanentes. A Dakar les espèces anophéliennes vectrices du paludisme ont des préférences pour les gîtes temporaires. La distinction entre gîtes permanents et gîtes temporaires permettait donc d'obtenir une information sur les écarts de présence larvaire entre ces deux types de gîtes.
- Il était associé à la présence de sols boueux qui caractérisent des collections d'eaux persistant plusieurs semaines et donc plus susceptibles de contenir des larves. En effet, une collection d'eau doit persister suffisamment longtemps pour permettre le passage par tous les stades larvaires nécessaires avant l'éclosion des moustiques adultes.

Dans la présente zone d'étude, les données de terrain ne permettent pas de tirer de telles conclusions mais malgré cela, il semble que l'association trouvée entre le NDWI McFeeters et la densité larvaire soit cohérente car cet indicateur a des propriétés de détection de l'eau libre et il diminue avec la présence de végétation.

Le cumul des pluies sur 30 jours était aussi positivement associé à la densité larvaire, en cohérence de nouveau avec les résultats obtenus à Dakar. D'une part, le régime des pluies guide la disponibilité des eaux de surface nécessaires à la reproduction des moustiques. Bien que la présence d'eau ait déjà été prise en compte dans l'étape 1, la pluie pouvait, à l'étape 2, être un indicateur de la persistance des gîtes, et donc de leur propension à être des gîtes larvaires. D'autre part, la quantité de pluie indique la période de l'année dans laquelle on se situe, et donc la productivité larvaire globale dans la zone. Par exemple, le milieu de la saison des pluies sera globalement propice à une plus forte productivité vectorielle que la saison sèche.

La carte des gîtes larvaires résultant de l'inversion du modèle ajusté lors de cette étape 2, appliqué au résultat obtenu à l'étape 1, a été générée, dans les zones de 2km de rayon autour des 10 villages (8 villages ayant servi à la construction du modèle + les 2 autres villages de la zone d'étude). Par la suite, les applications de Bti ont été restreintes à une zone tampon (buffer) de 500m autour du contour des 5

villages choisis pour recevoir le traitement. La Figure 42 fournit un extrait de la prédiction pour le village de Goni (le même extrait que les Figures 40 et 41). Cette prédiction est le résultat de l'application du modèle pour toutes les dates comprises entre le 31 mai et le 24 juillet 2012 (le 24 juillet 2012 étant la dernière date pour laquelle les données de pluviométrie par satellite étaient disponibles à la date du calcul de la carte). Les résultats de ces 55 prédictions étaient sommés afin de définir les 5 niveaux de risque présentés sur l'image.

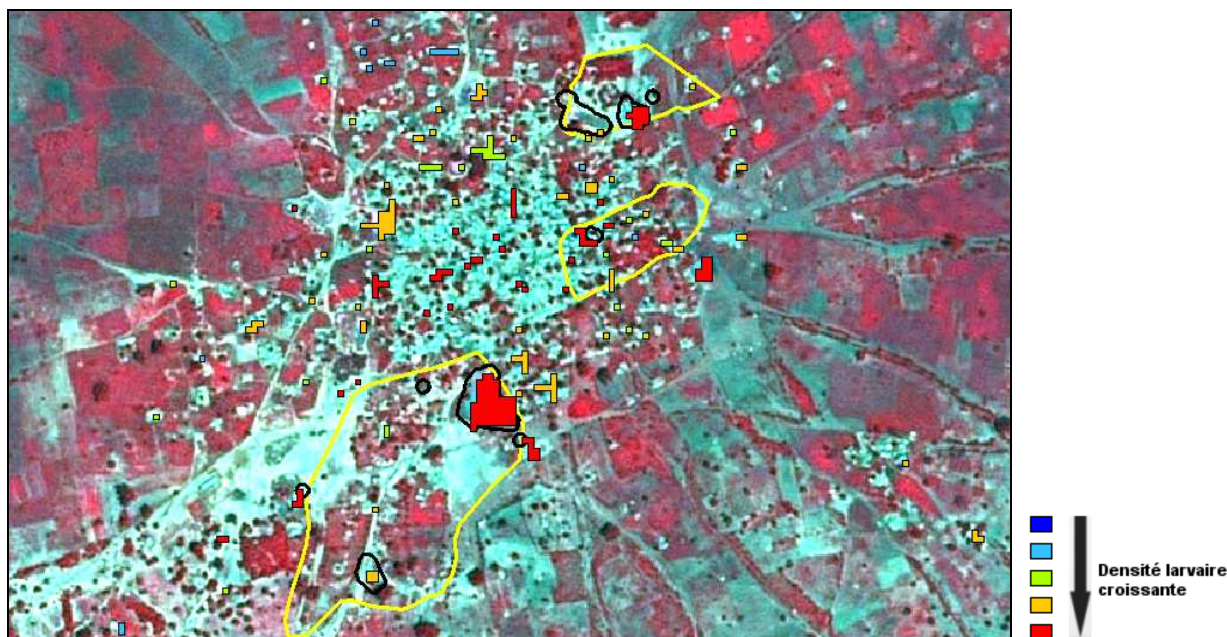


Figure 42: Somme des prédictions des densités larvaires d'anophèles pour la période du 31 mai au 24 juillet 2012 .

6.4. CARTOGRAPHIE DES DENSITES D'ADULTES

Les densités d'adultes dépendent de la productivité et de la surface des gîtes larvaires environnants. En effet, après l'émergence des nymphes, la dispersion des moustiques adultes autour de ce lieu d'émergence est réduite. Elle dépend des espèces en jeu, de l'environnement et de la disponibilité des repas de sang (c'est-à-dire de la présence d'hommes ou d'animaux). Pour *Anopheles gambiae*, on peut considérer que la dispersion est de l'ordre de quelques centaines de mètres, en milieu rural. Quant à la survie quotidienne des adultes de cette espèce, elle a été documentée à 82%. Cela signifie que si 82% des spécimens survivent d'un jour à l'autre, une population initiale est éteinte en 1 mois environ.

L'objectif était ici de rechercher les liens entre les densités larvaires prédites à l'étape 2 et le nombre d'anophèles adultes capturés au sol et de montrer si la carte de l'étape 2 a une valeur prédictive du risque de piqûres en un lieu donné.

Une variable de productivité larvaire dans une zone tampon de 500m de rayon autour des points de captures a donc été calculée dans le SIG. Elle était la somme des densités larvaires de chaque gîte (modélisées à l'étape 2), multipliée par la part de leur surface incluse dans la zone tampon (modélisée à l'étape 1). Ce produit était calculé pour chacun des 30 jours précédant une date donnée pour prendre en compte le taux de survie. La décroissance quotidienne de 18% était alors appliquée. Pour chaque poste de capture de moustiques adultes au sol, une valeur de productivité larvaire était ainsi disponible (nommé par la suite « productivité larvaire », prenant en compte les surfaces en eau et les densités larvaires prédites par les modèles et la mortalité de l'espèce vectrice principale de la région).

Seuls les villages n'ayant pas subi de traitement Bti étaient inclus dans l'analyse, afin que les relations larves/adultes ne soient pas biaisées par les actions de lutte antivectorielle. Les points GPS des postes de capture au sol étaient disponibles pour 4 des 5 villages non traités : Cissé, Kamadena, Konkuini et Labarani.

Plusieurs niveaux d'analyses étaient choisis, concernant le nombre de moustiques capturés :

- Les valeurs individuelles au niveau de chaque poste de captures étaient conservées (3 postes de captures par zone).
- Les valeurs des captures étaient sommées par zone (3 zones par village).
- Les valeurs des captures étaient sommées par village.

Le nombre de moustique était la somme de toutes les espèces d'anophèles capturées, la très large majorité des spécimens étant des *A. gambiae* s.l. A chaque poste, les valeurs des captures intérieures + extérieures étaient sommées.

Les corrélations (corrélation de rang de Spearman), étaient alors recherchées entre la variable « productivité larvaire » et le nombre d'anophèles capturés au sol, pour chaque date de capture à chacun des 3 niveaux d'analyse.

D'autre part, des modèles de régression ont aussi été ajustés afin de rechercher les capacités prédictives de la variable « productivité larvaire » sur le nombre d'adultes capturés à une date donnée, pour chacun des 3 niveaux d'analyse. Dans un environnement urbain (Dakar), une variable supplémentaire à la « productivité larvaire » s'était montrée utile pour la prédiction des adultes : la densité de bâtiments, qui donnait une indication sur la densité de population humaine et donc sur la dilution des piqûres d'anophèles dans des lieux très peuplés. Dans l'environnement rural de Nouna, l'inclusion de cette variable n'a pas semblée justifiée.

Pour pallier les problèmes d'association non linéaire entre la variable explicative et la variable à expliquer, une transformation logarithmique a été appliquée sur la « productivité larvaire ».

La variable à expliquer était un dénombrement (nombre d'anophèles adultes capturés à une date donnée) et elle était surdispersée, c'est-à-dire que sa variance était très supérieure à sa moyenne. Des régressions binomiales négatives ont donc été utilisées pour rechercher l'association entre la « productivité larvaire » et le nombre d'adultes. De la même façon que pour les étapes précédentes, le schéma de collecte de données pouvait impliquer l'existence d'autocorrélations spatiales entre les observations faites dans un même village. Ainsi, un effet aléatoire au niveau du village a été ajouté.

6.4.1. Résultats/ Discussion

Pour les 4 villages, entre 11 et 13 séances de captures étaient incluses dans l'analyse, correspondant à autant de dates. Selon le niveau d'analyse, le nombre d'observations était différent : respectivement 345, 132 et 46 observations pour chacun des 3 niveaux présentés précédemment. Les dates étaient comprises entre le 03/08/2012 et le 12/12/2012.

1) Niveau d'analyse 1

Le coefficient de Spearman n'était que de 0.046 ($p=0.3937$), indiquant une très faible corrélation non significative entre la « productivité larvaire » et le nombre total d'adultes capturés par date et par poste. En ne prenant en compte que les captures intérieures, le coefficient était un peu accru (0.15, $p=0.0027$) mais l'interprétation biologique était difficile.

Les résultats de la modélisation binomiale négative sont présentés dans le Tableau 13. L'association était à la limite de la significativité.

Tableau 13. Recherche de l'association entre la « productivité larvaire » et le nombre d'anophèles capturés par poste de capture. Régression binomiale négative avec effet aléatoire au niveau du village.

345 observations dans 4 villages	Coef	95% IC*	p-value
« Productivité larvaire » (transformation logarithmique)			
Par 0,1	0.74	[-0.02 ; 1.50]	0.057

* Intervalle de confiance à 95%

2) Niveau d'analyse 2

Le coefficient de Spearman était de 0.20 ($p=0.0236$), indiquant une faible corrélation significative entre la « productivité larvaire » et le nombre total d'adultes capturés par date et par zone. En ne prenant en compte que les captures intérieures, le coefficient était un peu accru (0.23, $p=0.0233$) mais l'interprétation biologique restait toujours difficile.

Les résultats de la modélisation binomiale négative sont présentés dans le Tableau 14. L'association était significative.

Tableau 14. Recherche de l'association entre la « productivité larvaire » et le nombre d'anophèles capturés par zone (3 zones dans chaque village). Régression binomiale négative avec effet aléatoire au niveau du village.

132 observations dans 4 villages	Coef	95% IC*	p-value
« Productivité larvaire » (transformation logarithmique)			
Par 0,1	1.59	[0.31 ; 2.87]	0.015

* Intervalle de confiance à 95%

3) Niveau d'analyse 3

Le coefficient de Spearman n'était que de 0.12 ($p=0.4264$), indiquant une faible corrélation non significative entre la « productivité larvaire » et le nombre total d'adultes capturés par date et par village. En ne prenant en compte que les captures intérieures ou extérieures, le coefficient n'était pas accru.

Les résultats de la modélisation binomiale négative sont présentés dans le Tableau 15. L'association n'est pas significative.

Tableau 15. Recherche de l'association entre la « productivité larvaire » et le nombre d'anophèles capturés par villages. Régression binomiale négative avec effet aléatoire au niveau du village.

46 observations dans 4 villages	Coef	95% IC*	p-value
« Productivité larvaire » (transformation logarithmique)			
Par 0,1	1.59	[-0.23 ; 3.42]	0.087

* Intervalle de confiance à 95%

En conclusion de cette analyse, des corrélations existent entre la « productivité larvaire » et le nombre d'anophèles capturés au sol mais leur force est assez faible. L'analyse au niveau de la zone semble la plus appropriée, ce qui paraît cohérent avec la réalité du terrain. En effet, à l'échelle du village, des environnements différents sont agrégés et la variabilité entre zones est perdue. A l'inverse, le niveau poste de capture est probablement trop fin et des effets très locaux et ponctuels peuvent venir « bruite » (*i.e.* réduire) le lien avec la productivité larvaire. En particulier, l'attractivité variable des captureurs est mieux prise en compte par des données agrégées.

Malgré les résultats significatifs de l'analyse binomiale négative, la prédiction du nombre d'adultes à partir de la « productivité larvaire » montrait une faible corrélation avec les valeurs mesurées. Il est donc probable que d'autres facteurs n'ayant pas été pris en compte aient un pouvoir prédictif du risque de piqûres. C'est pour cette raison qu'aucune carte de risque de piqûres n'est présentée.

6.5. VALIDATION DES CARTES DE PREDICTION DES COLLECTIONS D'EAU

Durant l'année 2012, des visites de terrain ont eu lieu afin de valider les cartes de prédiction des collections d'eau issues des modèles détaillés plus haut. Dans des zones de 500m de rayon autour des villages, une prospection systématique a été réalisée afin de pointer au GPS toutes les collections d'eau présentes au moment de la visite ou plus tôt dans la saison. L'évaluation de la présence passée d'eau a été réalisée visuellement par un agent ayant une bonne connaissance du terrain et parfois par questionnaire auprès de la population locale. Tous les points GPS relevés ont alors été inclus dans le SIG pour y être superposés avec la carte de prédiction de l'année 2012.

Le Tableau 16 fournit le détail des résultats de la validation.

Tableau 16 : Résultats de la validation des cartes de prédiction des collections d'eau

<i>Localité</i>	<i>Nombre de collections d'eau prédites par le modèle</i>	<i>Nombre de collections d'eau prédites par le modèle et existant au sol</i>	<i>Nombre de collections d'eau prédites par le modèle mais n'existant pas au sol</i>	<i>Nombre de collections d'eau existantes au sol mais non prédites par le modèle</i>
Bourasso	49	47	2	8
Tissi	30	27	3	21
Goni	98	98	0	26
Kansara	110	98	12	52
Biron Marka	89	81	8	43
Total	376	351	25	150

Total des collections d'eau existant au sol

501

D'une part, 93% des collections d'eau prédites par le modèle sont en effet des collections d'eau existant au sol. D'autre part, 75 % des collections existant réellement au sol sont correctement prédites par le modèle.

6.6. VALIDATION DES CARTES DE PREDICTION DES GITES LARVAIRES

En raison de difficultés liées à l'identification des positions géographiques des gîtes larvaires suivis en 2012 (cf. paragraphe 4 sur la campagne de mesures 2012), il n'a pas été possible de valider les cartes de risque dressées au niveau larvaire.

7. STRATEGIE D'ADAPTATION AU RISQUE PALUDIQUE

Un des objectifs du projet Paluclim était de montrer qu'une stratégie larvicide peut être ciblée (orientée) dans ce type de zone rurale (démonstration de la faisabilité, analyse des avantages, difficultés et limites), et de vérifier que cette stratégie peut améliorer la situation entomologique

En parallèle de la campagne de mesures entomologiques, la stratégie larvicide a donc été mise au point et a été testée. Le contrôle des larves de moustiques avec des larvicides biologiques, présente des avantages significatifs par rapport au seul contrôle des moustiques adultes ou la lutte contre la maladie.

- Premièrement, un certain nombre d'études ont montré l'efficacité et l'innocuité du larvicide (Mittal, 2003). Il s'agit d'une toxine naturelle qui est produite par la bactérie *Bacillus thuringiensis israelensis* (Bti).
- Deuxièmement, contrairement aux adultes qui peuvent se déplacer, limitant ainsi l'efficacité d'une éventuelle application d'insecticide, les larves sont confinées dans des gîtes larvaires de faible dimension. La multitude et la dispersion de ces gîtes sont cependant une difficulté importante de mise en œuvre de cette stratégie.
- Troisièmement, ces agents de lutte biologique sont faciles à utiliser et sont sans danger pour l'environnement et l'utilisateur. Les nouvelles formulations en granulés (WDG, water dispersible granule) peuvent être stockées pendant des années sans perte d'activité et se dissolvent facilement dans l'eau.
- Quatrièmement, ils sont très efficaces par rapport au coût de l'intrant (insecticide). Dans des expériences préliminaires, dans un quartier de Cotonou (Bénin) comprenant 1000 logements, il a été montré que des sites de reproduction existaient sur moins de 1ha et qu'ils ont pu être traités avec le larvicide Bti pour éliminer les larves des Anophèles. Moins de 500 grammes du produit ont été nécessaires correspondant à 15 \$ / par traitement / par quartier (Lingenfelser et al., 2010). Dans les zones rurales où les gîtes larvaires peuvent être plus nombreux et dispersés, le coût de la main d'œuvre et des intrants peut faire perdre de son intérêt à cette stratégie.
- Cinquièmement, tous les autres organismes ne sont pas affectés, à savoir les prédateurs naturels présents dans les aires de reproduction. En raison de cette sélectivité extraordinaire, ces larvicides peuvent même être utilisés en combinaison avec des prédateurs implantés par l'homme (par exemple, *Gambusia*) (Becker et al. 2003).

- Sixièmement, par un programme intégré qui ne repose pas uniquement sur la base des moustiquaires imprégnées, la probabilité du développement d'une résistance aux pyréthrinoides utilisées pour l'imprégnation des moustiquaires, est fortement réduite. En effet, l'association de plusieurs méthodes complémentaires de lutte anti-vectorielle tend à diminuer le risque de sélection des individus résistants.

En milieu rural, il existe cependant peu d'évidence que cette stratégie soit efficace ou ait un ratio coût-efficacité intéressant sur les infections plasmodiales ou sur la morbidité.

7.1. TEST DE L'EFFICACITE ET REMANENCE SEMI-TERRAIN

7.1.1. Protocole pour trouver le dosage de Bti applicable sur les gîtes larvaires

Les quantités nécessaires par surface à traiter ont été fixées grâce à un essai expérimental dans des bacs plastique, incluant de la végétation et la faune naturelle (Fillinger et al., 2003). Le dosage létal trouvé dans cette expérience a permis de trouver un dosage assez efficace pour le traitement des gîtes larvaires en s'appuyant sur les cartes de risque vectoriel montrant la prédiction des gîtes larvaires et leur productivité. Le test pour trouver le bon dosage de Bti a été fait pendant deux mois sur 28 jours en testant dans 20 bacs, différentes concentrations de Bti (cf. Figure 43). Le Bti a été épandu tous les 7 jours, respectivement au jour 1, 7, 14 et 21. Un prélèvement (4 louches) et un comptage des larves ont été effectués chaque jour pendant la durée de l'expérimentation. Une fois comptées, les larves sont remises dans le bac afin de déterminer la rémanence du Bti.

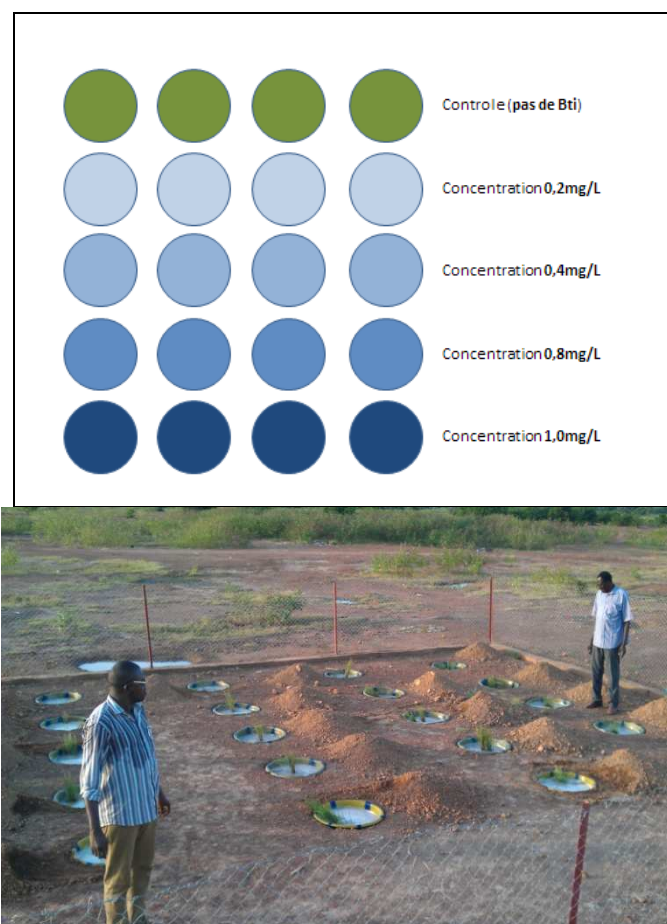


Figure 43 : Représentation des 20 bacs utilisés pour l'expérimentation destinée à trouver le dosage létal de Bti (à gauche), Mise en place du terrain d'expérimentation (à droite)

7.1.2. Résultats du test semi terrain

Toutes les concentrations (cf. Figure 44) du Bti utilisées ont tués avec succès 100 pour cent des larves dans les bacs en 24 heures. Les concentrations plus élevées (0,8mg/L et 1,0mg/L) ont montré un effet résiduel légèrement prolongé par rapport aux concentrations en larvicide de 0,2 et 0,4 mg/L. La recolonisation naturelle des larves a eu lieu deux à trois jours après l'application du Bti, les larves de stade 3 et 4 n'ont pas été trouvées avant cinq jours après le traitement. Pour les concentrations plus

élevées, l'effet protecteur contre la recolonisation a été observé jusqu'à trois jours après le traitement. La réduction moyenne de nymphes dans des bacs traités était de 98,5%. La Figure 44 et le Tableau 17 donne les résultats pour le premier « round » de l'expérience qui a été réalisé à partir le 8 octobre 2013 sur une période de 28 jours. Les résultats détaillés, incluant le deuxième rond (décembre 2012 à Janvier 2013) sont présentés dans Dambach et al. 2014a (soumis).

Les différentes concentrations testées ont été appliquées pendant les 28 jours de l'expérimentation à raison d'une application hebdomadaire. Malgré l'apparition des larves aux stades 1 et 2 dans un temps relativement court, pratiquement aucune nymphe n'a pu se développer entre deux applications de Bti. Dans les intervalles d'intervention hebdomadaires, les larves n'étaient pas capables de se développer en nymphes et imagos. Malgré le faible effet résiduel (létalité dans l'eau) d'environ deux jours quelle que soit la concentration en Bti et la recolonisation rapide des larves de tous genres, la diminution du nombre de nymphes est importante et peut être considérée comme l'indicateur principal pour mesurer l'efficacité antivectorielle directe des interventions à base de larvicides (Su and Mulla, 1999). Une extension de l'intervalle de pulvérisation de deux jours devrait toujours éviter l'éclosion de moustiques adultes. Sur la base de ces résultats, une application de larvicide tous les 9 à 10 jours, avec une concentration de 0,4mg/L (correspondant à 0,4kg/ha), a été retenue pour réaliser la lutte focalisée dans les villages de l'étude.

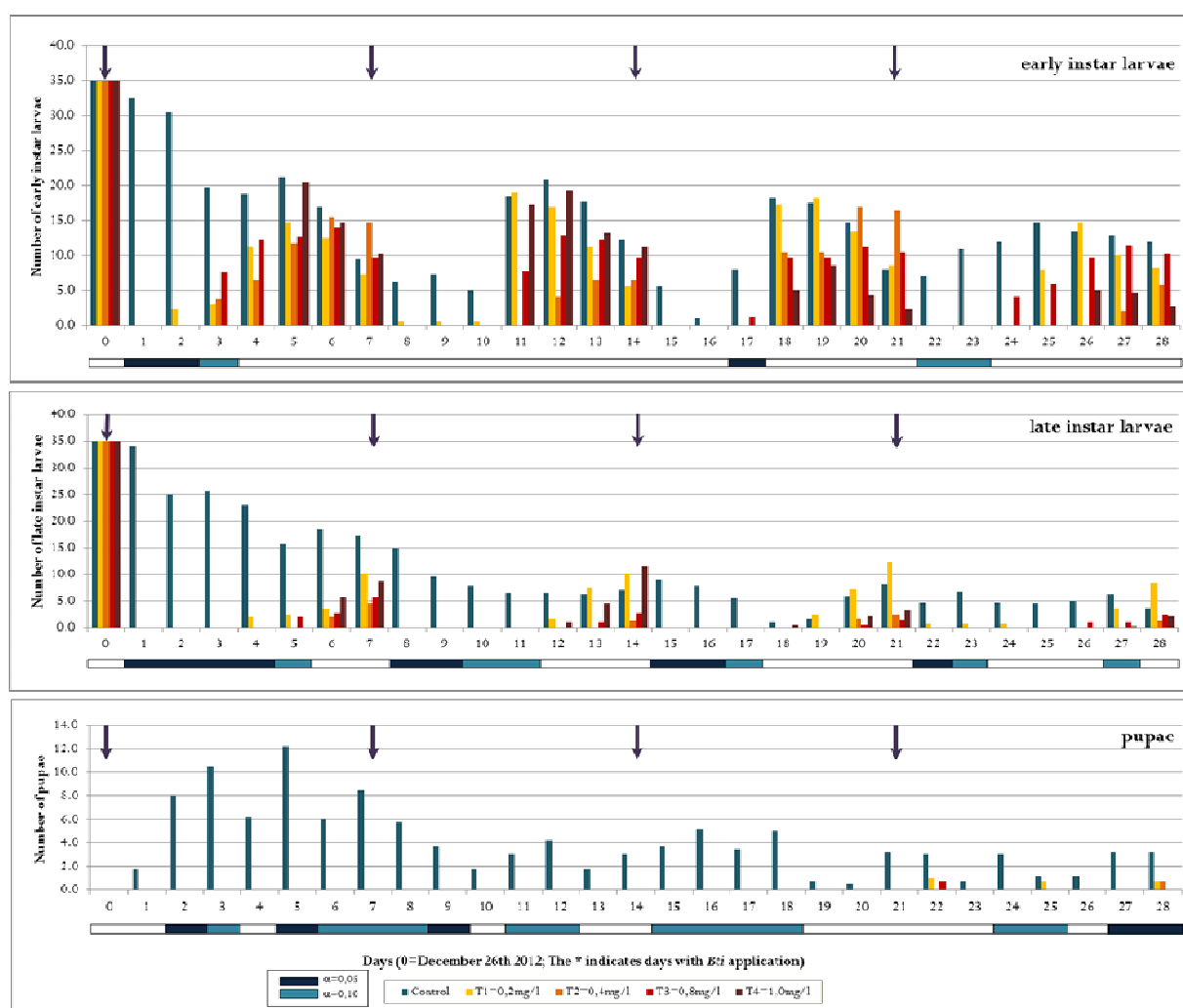


Figure 44 : Dynamique des populations des larves (stade 1+2=early ; stade3+4=late ; pupae=nymphes) dans l'expérimentation semi-terrain. Aux jours marqués avec une flèche (jour 0, 7, 14 et 21) différentes concentrations de WDG (water dispersible granule) de Bti ont été testées. Le diagramme montre le premier mois d'application entre le 8 Octobre et le 5 novembre 2012. Les flèches indiquent un traitement Bti. Les barres horizontales bleues montrent une réduction significative avec $\alpha=0,05$ et $\alpha=0,10$ dans des tests de rang Kruskal Wallis one way anova.

Tableau 17 : Effet de différentes concentrations de WDG Bti sur des larves des Anophèles et le pourcentage de réduction après l'application du larvicide. C=contrôle, T1=0,2mg/l, T2=0,4mg/l, T3=0,8mg/l, T4=1,0mg/l. Entre le 8 octobre et le 5 novembre 2012. Calcul de la réduction en utilisant la formule de Mulla (Su and Mulla 1999)

Average number per tub															Percentage reduction								
Early instars						Late instars					Pupae				Early instars				Late instars				
Day	C	T1	T2	T3	T4	C	T1	T2	T3	T4	C	T1	T2	T3	T4	T1	T2	T3	T4	T1	T2	T3	T4
0*	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0								
1	46.0	12.5	0.0	0.0	0.0	48.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	73	100	100	100	100	100	100	100
2	25.0	10.5	8.0	3.0	3.3	27.3	0.0	0.0	0.0	0.0	44.5	0.0	0.0	0.0	0.0	58	68	88	87	100	100	100	100
3	24.0	23.8	20.8	12.5	12.5	32.3	0.0	0.0	0.0	0.0	14.5	0.0	0.0	0.0	0.0	1	14	48	48	100	100	100	100
4	16.0	21.3	24.0	15.3	19.3	20.0	2.0	1.8	0.0	2.0	4.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	5	0	90	91	100	90
5	13.7	17.5	21.0	14.3	15.5	14.0	20.3	8.5	6.5	9.8	1.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0	0	0	39	54	30
6	13.7	10.0	14.8	11.5	15.8	13.7	15.3	12.3	8.8	13.0	3.0	0.0	0.0	0.0	0.0	27	0	16	0	0	10	36	5
7*	5.0	4.8	7.5	9.5	10.8	8.3	18.0	13.0	15.0	12.8	3.8	0.0	1.0	0.0	0.3	5	0	0	0	0	0	0	0
8	13.8	0.0	0.0	0.0	0.0	9.3	0.5	0.0	0.0	0.0	2.8	0.0	0.0	0.0	0.0	100	100	100	100	97	100	100	100
9	15.3	2.5	0.0	0.0	0.0	8.8	0.5	0.0	0.0	0.0	1.8	0.0	0.0	0.0	0.0	83	100	100	100	97	100	100	100
10	11.8	2.5	0.0	0.0	0.0	10.8	0.0	0.0	0.0	0.0	1.3	0.5	0.0	0.0	0.0	78	100	100	100	100	100	100	100
11	7.5	5.8	14.3	16.3	17.5	19.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0	19	0	0	0	100	100	100	100
12	17.5	12.0	23.3	24.5	20.0	18.5	0.0	0.0	0.0	0.0	2.8	0.0	0.0	0.0	0.0	28	11	26	47	100	100	100	100
13	22.5	13.5	23.5	23.8	18.0	22.0	1.0	1.3	0.0	0.0	1.8	0.0	0.0	0.0	0.0	37	30	44	63	98	96	100	100
14*	11.3	9.0	25.0	13.8	17.5	23.5	4.5	1.3	10.5	3.8	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0	0	90	96	73	89
15	4.0	0.0	0.0	0.0	0.0	41.5	0.0	0.0	0.0	0.0	1.5	0.0	0.0	0.0	0.0	100	100	100	100	100	100	100	100
16	0.0	14.0	8.8	8.3	0.0	46.3	0.0	0.0	0.0	0.0	3.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0	0	100	100	100	100
17	0.0	14.0	6.8	17.8	11.5	43.3	0.0	0.0	0.0	0.0	3.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0	0	100	100	100	100
18	7.3	12.8	4.8	17.8	25.5	38.8	0.0	0.0	0.0	0.0	8.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	71	0	0	100	100	100	100
19	4.5	6.5	8.8	23.8	18.5	30.3	5.5	1.0	5.0	0.0	9.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0	13	0	0	5	38	63	100
20	11.3	5.8	10.5	17.3	13.3	31.8	8.3	1.8	10.3	3.5	5.3	0.0	0.0	0.0	0.0	36	58	0	24	0	0	28	31
21*	15.0	7.3	22.0	25.0	10.3	43.5	8.8	3.5	14.0	5.5	2.8	0.0	0.0	0.0	0.0	40	34	0	56	0	0	28	21
22	15.0	0.0	0.0	0.0	0.0	36.8	1.3	0.0	0.8	0.5	6.3	1.0	0.0	0.8	0.0	100	100	100	100	83	100	94	89
23	15.0	0.0	0.0	0.0	0.0	34.5	1.3	0.0	0.8	0.5	8.3	0.0	0.0	0.0	0.0	100	100	100	100	82	100	93	89
24	23.0	3.3	19.0	8.3	26.0	25.0	1.0	0.0	0.5	1.0	8.5	0.0	0.0	0.0	0.0	71	44	78	0	80	100	94	68
25	20.5	22.5	28.3	19.0	28.5	31.5	0.5	0.0	0.0	0.0	3.8	0.8	0.0	0.5	0.0	0	6	44	0	92	100	100	100
26	20.5	17.3	21.3	15.5	32.5	29.0	4.3	24.8	5.8	12.5	0.5	0.0	2.0	0.0	0.0	0	29	55	0	27	0	38	0
27	15.0	10.5	12.5	17.5	17.5	33.0	6.0	36.0	8.0	26.0	5.0	1.0	0.5	0.0	0.0	0	43	30	0	10	0	25	0
28	7.5	9.3	28.8	15.3	17.5	32.8	2.0	29.5	14.8	34.0	4.0	2.3	0.8	0.3	1.8	0	0	0	0	70	0	0	0

7.2. APPLICATION DU BTI SUR LE TERRAIN

7.2.1. Protocole utilisé pour une stratégie larvicide orientée

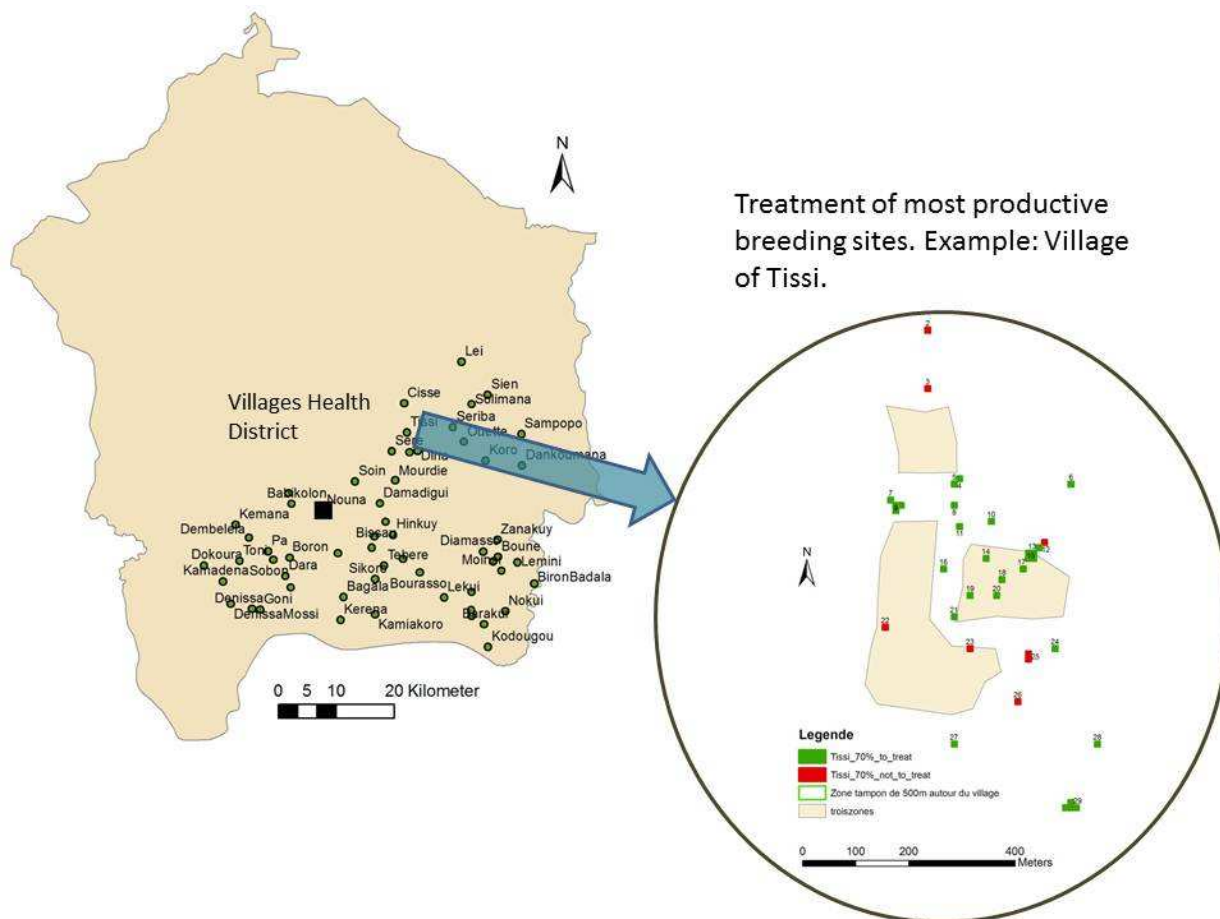
Les modèles entomologiques établis à partir des données de 2011 ont permis de construire des cartes opérationnelles du risque vectoriel pour 2012 à l'échelle des villages. La prédiction de la présence des collections d'eau a tout d'abord été faite en inversant le modèle de l'étape « Cartographie des collections d'eau » et en l'appliquant à l'image SPOT-5 du 24 septembre 2011. En effet, il était attendu que les modifications du terrain entre cette date et l'année 2012 seraient minimales. Il n'a donc pas été jugé nécessaire d'acquérir une nouvelle image au cours de la saison des pluies de 2012. La probabilité de présence d'eau a été calculée avec les indices NDPI, le NDWI Mac Feeters et les classes d'occupation du sol « Eau contenant de la végétation » + « eau libre » de la classification LULC de l'image de 2011.

Ensuite, grâce à l'application du modèle de l'étape « Cartographie des gîtes larvaires », les densités larvaires ont été calculées pour chacune des collections d'eau prédites pour tous les jours du 31 mai au 14 juillet 2012 (dernière date pour laquelle on pouvait avoir les données de pluie par satellite au jour du calcul des cartes). La somme de toutes ces prédictions était alors considérée comme la variable de densité larvaire à prendre en compte pour cibler l'application de Bti. Pour chaque jour, la prédiction était faite en utilisant : la moyenne de NDWI Mac Feeters dans et autour (anneau de 10m) des collections d'eau + le cumul des pluies dans les 30 jours précédents (la pluie étant spécifique à chaque village), conformément au modèle de l'étape de « Cartographie des gîtes larvaires ». Les cartes des densités larvaires ont été générées dans les zones de 2km de rayon autour des 10 villages, pour une application effective du Bti restreinte à une zone tampon de 500m autour du contour des 5 villages choisis pour recevoir le traitement.

Le seuil de densité larvaire était alors choisi de façon à ne traiter au Bti que 50% de la surface totale ayant été prédites comme la plus productive en larves. Les gîtes larvaires étaient ainsi classés par ordre de risque larvaire prédit, puis le seuil de 50% de la surface totale était appliqué afin de cibler les gîtes les plus à risque. Le seuil de 50% a été choisi pour des raisons économiques. Le but de l'intégration de cette méthode dans un projet à grande échelle, est d'optimiser le rapport coût /bénéfice.

Ces cartes ont alors été utilisées par les équipes sanitaires pour mettre en place la stratégie larvicide et réaliser in situ la lutte anti-larvaire. Le personnel de terrain a traité les gîtes larvaires sélectionnés dans les zones d'intervention. Les gîtes de reproduction des moustiques les plus productifs selon le modèle de prédiction étaient traités avec le Bti pour réduire l'émergence et le nombre de moustiques adultes (cf.

Figure 45). A partir de début octobre 2012, une équipe locale a procédé à l'application du larvicide *Bti*. L'équipe de pulvérisation et un technicien entomologiste ont traité les gîtes de reproduction en appliquant les doses selon le protocole établi précédemment en fonction des dimensions du point d'eau et de la formulation du produit utilisé. Le larvicide vient comme complément dans la gestion intégrée des vecteurs. Les autres mesures antipaludiques (moustiquaires imprégnées, diagnostic précoce et prise de médicaments antipaludéens) au niveau du district n'ont pas été changées entre 2011 et 2012, facilitant l'intégration de cette méthode au-delà de l'exécution dans un environnement de recherche. L'application du larvicide dans les cinq villages test a été faite par des agents du terrain qui utilisaient des pulvérisateurs. Une équipe avec GPS et les cartes de productivité, repéraient les gîtes à traiter sur le terrain et les marquaient avec un bois en couleur pour être retrouvés pendant les traitements hebdomadaires. Si le gîte se trouvait dans une des trois zones de prélèvement, la densité larvaire était recherchée avant le traitement.



Dates d' APPLICATION Bti			
Oct-02		Nov-12	
Dates	Lieux	Dates	Lieux
10/4/2012	TISSI	11/1/2012	KANSARA
10/6/2012	BIRON MARKA	11/6/2012	BOURASSO
10/9/2012	KANSARA	11/7/2012	GONI
10/12/2012	BOURASSO	11/11/2012	BIRON MARKA
10/14/2012	GONI	11/17/2012	BOURASSO
10/15/2012	GONI	11/19/2012	GONI
10/18/2012	BIRON MARKA		
10/20/2012	KANSARA		
10/24/2012	BOURASSO		
10/26/2012	GONI		
10/27/2012	TISSI		
10/30/2012	BIRON MARKA		

Figure 45 : Exemple d'une carte de risque pour le village de Tissi (à gauche). En rouge les collections d'eau prédites par le modèle comme étant moins productives, en vert les gîtes les plus productifs qui ont été traités. Dates de traitement avec Bti dans les 5 villages qui recevaient l'intervention (à droite)

7.2.2. Impact du traitement Bti sur les densités des Anophèles

Comme décrit plus haut, les captures des moustiques adultes ont pris place entre le 20 juillet et le 13 décembre 2012. La période d'intervention Bti s'étendait entre le 4 octobre et le 19 novembre. L'expérimentation devait permettre une comparaison entre les 5 villages qui ont reçus une intervention et les 5 autres qui n'en ont pas reçu et qui servaient de contrôle. La collecte des moustiques a commencé avant la pulvérisation du Bti, qui a débuté avec un retard de quelques semaines (cf. paragraphe 4 sur la

campagne de mesures 2012)) par rapport au protocole de recherche. Malgré des problèmes logistiques (larvicides livrés avec retard par le fournisseur), l'expérimentation Bti a pu être menée pendant un mois et demi. Le traitement des gîtes dans les villages a eu lieu suivant le calendrier indiqué dans la Figure 45.

Cette activité est décrite en détail dans le protocole présenté au paragraphe 7.2.1. La Figure 46 montre la distribution temporelle par village des anophèles adultes capturés.

Un test statistique Cochran-Mantel-Haenszel sur les rangs ($\alpha=0.05$) a été utilisé pour comparer le nombre de moustiques capturés entre les villages traités et non-traités (logiciel SAS 9.2., SAS Institute Inc. Cary, NC USA). Le nombre de moustiques capturés dans les postes extérieurs et intérieurs entre des villages traités en fonction des cartes de risque entomologique et les villages témoins ne montre pas une diminution significative de l'abondance des vecteurs (cf. Tableau 18).

Ici on observe une grande variabilité du nombre de vecteurs capturés pendant la pleine saison des pluies jusqu'à mi-septembre. Avec la diminution des pluies à partir d'octobre, le nombre des moustiques capturés reste toujours élevé mais les valeurs montrent une variance beaucoup plus basse. Plusieurs raisons peuvent être à l'origine de cette observation. Premièrement en début de saison pluvieuse tous les points de collections ne sont pas encore complètement remplis ou formés comme en septembre/octobre, et cela peut conduire à une productivité vectorielle plus hétérogène. Deuxièmement, des fortes précipitations, principalement entre juin et début septembre, peuvent être responsables d'une dilution et d'un lavage des gîtes larvaires, influençant l'abondance des vecteurs vers une haute variabilité.

Les effets des applications des larvicides sur des densités vectorielles sont reportés dans de nombreuses études (Fillinger and Lindsay 2006; Fillinger et al. 2009) ainsi que l'impact sur la réduction des cas de paludisme (Nyarango et al. 2006). Pourtant certains travaux n'ont pas trouvé d'effet en milieu rural. Les raisons principales de l'absence de corrélation statistique peuvent s'expliquer par une période d'intervention trop courte, trop tardive. Comme expliqué auparavant, l'intervention a débuté tardivement, en fin de la saison des pluies 2012, période où le nombre de moustiques décroît naturellement, ce qui pourrait expliquer le faible impact du *Bti* sur la réduction du nombre de moustiques. En outre, le seuil de densité larvaire retenu pour effectuer le traitement au Bti (cf. paragraphe 7.2.1) n'a pas contribué à une diminution maximale de vecteurs. Enfin, d'autres facteurs tels que la distance de vol de moustiques permettant l'arrivée de moustiques venus de plus loin, ou le non traitement de certains gîtes non prédits peuvent avoir contribué à cette absence de diminution significative du nombre de moustiques après le traitement anti-larvaire.

Il faut noter que même si au cours de cette première étude de faisabilité dans cette région, la diminution de la pression entomologique n'a pas pu être démontrée (pour les raisons évoquées ci-dessus), la prise en main de cet outil innovant par les acteurs opérationnels de la lutte sur le terrain a été effective et la mise en œuvre d'un traitement ciblé à partir des cartes de risque entomologique prédit a été possible. Une nouvelle campagne à plus grande échelle est donc prévue afin de valider cette méthode de stratégie larvicide orientée et d'en mesurer quantitativement son efficacité et son efficacité.

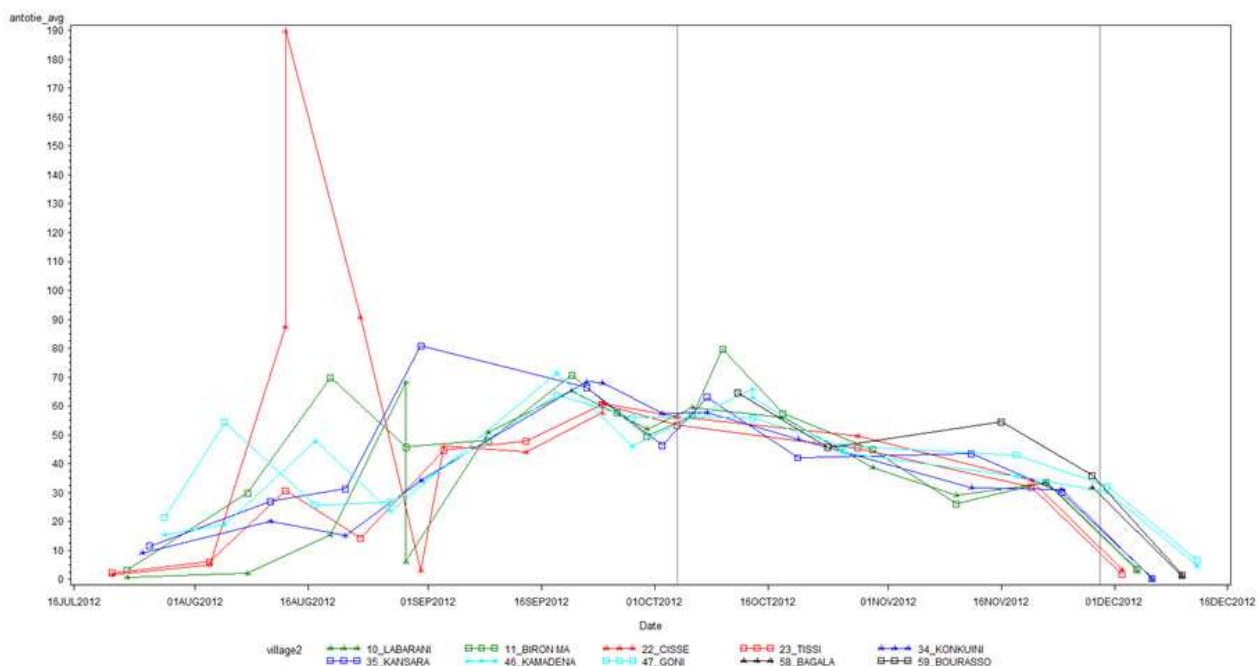


Figure 46 : Captures de moustiques *Anophèles spp.* femelles pour la période d'observation. Indiqué avec des barres noires verticales la période d'intervention Bti.

Tableau 18 : valeurs moyennes du nombre d'*Anophèles spp.* Femelles capturés par nuit et par personne dans les villages traités par Bti et dans les illages témoins (sans traitement). L'écart type et le nombre de mesures effectuées sont aussi indiqués. Trois périodes sont considérées : juillet-août où aucun traitement n'a pris place, septembre-octobre où la moitié des 10 villages a été traité avec le Bti (2 à 4 applications par village considéré) et Décembre où de nouveau aucun traitement n'a eu lieu. Les valeurs sont données pour les captures faites à l'intérieur, à l'extérieur et pour les deux ensembles. Les moyennes entre village traité et non-traités ne diffèrent pas de façon statistiquement significatives au cours de la période d'étude.

Intérieur	Juil-Aout			Sept-Oct			Dec		
	Moyenne	Ecart type	N	Moyenne	Ecart type	N	Moyenne	Ecart type	N
non traité	2,89	2,56	1931	1,82	1,36	1667	0,86	0,92	238
traité	2,82	2,18	2036	1,82	1,35	2184	1,00	1,02	264

Extérieur	Juil-Aout			Sept-Oct			Dec		
	Moyenne	Ecart type	N	Moyenne	Ecart type	N	Moyenne	Ecart type	N
non traité	2,57	2,12	1824	1,84	1,34	1595	1,43	1,87	239
traité	2,59	1,87	2011	1,84	1,33	2088	0,81	1,01	209

Int+Ext	Juil-Aout			Sept-Oct			Dec		
	Moyenne	Ecart type	N	Moyenne	Ecart type	N	Moyenne	Ecart type	N
non traité	5,49	3,77	2115	3,64	2,09	1644	3,42	4,24	323
traité	5,37	3,25	2183	3,65	2,08	2184	2,01	1,56	296

8. VALORISATION

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

- par la diffusion de l'information auprès des utilisateurs locaux à savoir les acteurs de la santé publique qui mettent en place les politiques de gestion de la santé publique via le site internet du CRSN (action en cours)
- par le biais de publications :

Une première publication présentant les premiers résultats préliminaires a été réalisée en 2012 (voir Annexe 4) :

- o **Utilization of combined remote sensing techniques to detect environmental variables influencing malaria vector densities in rural West Africa – International Journal of Health Geographics.** Peter Dambach, Vanessa Machault, Jean-Pierre Lacaux, Cécile Vignolles, Ali Sié and Rainer Sauerborn

Une autre publication vient d'être soumise et une autre est en préparation :

- o **Efficacy of *Bacillus thuringiensis* var. *israelensis* formulation against malaria mosquitoes in Northwestern Burkina Faso – Parasites and Vectors.** Peter Dambach, Valérie R Louis, Achim Kaiser, Saidou Ouedraogo, Ali Sié, Rainer Sauerborn, Norbert Becker
- o **Small scale variations in malaria vector abundance between rural villages in Burkina Faso, West Africa.** Peter Dambach, Eric Diboulo, Saidou Ouedraogo, Rainer Sauerborn, Ali Sié, Valérie R Louis

Plusieurs autres publications sont envisagées :

- o Un article de synthèse sur le projet Paluclim
- o Un article sur les résultats de la tâche 4 sur l'analyse climatique
- o Un article entomologique à l'échelle du village (malaria journal)
- par la participation à de colloques et/ou de journées thématiques :
 - o Présentation du projet aux 3èmes journées scientifiques de Nouna (20-22 novembre 2014)
 - o Utilisation des données dans les enseignements du master télédétection et risques naturels (université Antana et Univ dela Réunion)
 - o Utilisation des données et résultats du projet dans le cours régional climat & santé organisé par le CRSN à Nouna (novembre 2014)
- en mettant à disposition de la communauté les résultats de ces travaux sur le site Internet d'information sur les maladies ré-émergentes RedGems (<http://www.redgems.eu>)

CONCLUSIONS

Le paludisme constitue toujours le principal problème de santé publique en Afrique et plus particulièrement dans sa partie subsaharienne. Dans la région de Nouna, la zone d'étude, la transmission du paludisme est holo-endémique⁵ causant une importante mortalité notamment chez les enfants : 45 % des décès des enfants sont liés au paludisme (Traoré, 2003). 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 antipaludique de première ligne adopté par l'OMS et par le Burkina Faso : les thérapies à base de dérivés de l'artémisinine (Pfeiffer et al., 2008a). 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. Il y a de ce fait un fort intérêt pour les autorités de santé publique pour disposer de cartes spatio-temporelles identifiant des zones à haut risque de transmission.

⁵ Holoendémique : désigne une transmission constante et élevée, entraînant une immunisation importante dans tous les groupes d'âge, et particulièrement chez les adultes

Dans ce contexte d'enjeu de santé publique majeur, la prédiction spatio-temporelle du risque entomologique (larves et adultes) serait donc une aide précieuse à l'élaboration des stratégies de lutte antivectorielle que doivent mettre en place les autorités de santé publique. Bénéficiant des résultats d'études antérieures qu'ils ont menées et grâce au soutien du programme GICC, les partenaires du projet Paluclim (CNES, Institut de Santé publique de l'Université d'Heidelberg, Centre de recherche en santé de Nouna et Météo-France) ont mené un travail scientifique multidisciplinaire, comprenant la collecte et l'organisation des campagnes de mesures in-situ, la construction d'une base de données et d'un SIG, l'analyse des images satellites, et la modélisation bio-mathématique du risque entomologique. Par ce travail, il a été montré :

- qu'il est possible de construire un modèle de prédiction des gîtes larvaires permettant la mise à disposition opérationnelle de cartes dynamiques de productivité larvaire à l'échelle des villages
- qu'il est possible de mettre en place et d'appliquer une stratégie larvicide ciblée grâce à ces cartes de productivité larvaire.

Le fait que cette stratégie larvicide n'ait pas eu d'impact sur les densités de vecteurs adultes n'est très probablement pas lié à des facteurs dépendant du processus de ciblage des interventions qui a été mis en place et ne remet pas en cause l'utilisation d'une stratégie larvaire ciblée. L'apport de ces cartes de risque entomologique a été perçu sur le terrain par les acteurs de la lutte antipaludique comme un réel outil d'aide à la décision. Si cette première étude dans la région a montré la faisabilité d'un traitement anti-larvaire ciblé s'appuyant sur ces cartes de productivité larvaire, une opération à plus grande échelle est nécessaire et prévue afin de mesurer quantitativement l'efficience et l'efficacité d'une telle stratégie.

D'autre part, la pluviométrie étant un facteur déterminant de la densité de vecteurs (facteur pris en compte dans la construction de cartes de risque entomologique), une étude de l'évolution du risque palustre en fonction de la variabilité spatio-temporelle du climat a été menée. Pour évaluer l'incidence des conditions climatiques sur le risque palustre dans sa globalité, il a été nécessaire d'utiliser un modèle d'impact. Le modèle retenu est une adaptation du modèle de Craig. L'analyse climatique s'est faite à différentes échelles spatio-temporelles (échelle saisonnière, échelle régionale du changement climatique, et du quasi-biennal aux basses fréquences). Il en ressort que l'augmentation des températures devrait conduire à une réduction notable du risque palustre. Par conséquent, selon le modèle de Craig, l'élévation de la température deviendrait le facteur limitant pour le risque palustre sur la région de Nouna, allant jusqu'à le réduire très fortement en fin de siècle par rapport à son niveau actuel.

BIBLIOGRAPHIE

- Bader Jean-Claude, Piedelievre J. P., Lamagat Jean-Pierre. Seasonal forecasting of the flood volume of the Senegal River, based on results of the ARPEGE Climate model. *Hydrological Sciences Journal Journal Des Sciences Hydrologiques*, 2006, 51 (3), p. 406-417. ISSN 0262-6667
- 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.
- Bjerknes, J., 1964: Atlantic air-sea interaction. *Adv. Geophys.*, 10, 1-82.
- 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.
- CNES, 2008, Method for tele-epidemiology (Méthode pour la télé-épidémiologie). Patent pending # PCT/FR2009/050735
- 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.
- Dambach, P., V. Machault, J-P. Lacaux, C. Vignolles, A. Sié and R. Sauerborn, 2012, Utilization of combined remote sensing techniques to detect environmental variables influencing malaria vector densities in rural West Africa: *International Journal of Health Geographics*, 11:8
- Dambach, P., V.R. Louis, A. Kaiser, S. Ouedraogo, A. Sié, R. Sauerborn, and N. Becker, 2014, Efficacy of *Bacillus thuringiensis* var. *israelensis* formulation against malaria mosquitoes in Northwestern Burkina Faso: submitted in *Parasites and Vectors*.
- 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.
- Edwards, FW.: *Mosquitoes of the Ethiopian Region. III. Culicine Adults and Pupae*. London: British Museum (Natural History); 1941.
- Enfield, D.B., A.M. Mestas-Nunez, and P.J. Trimble, 2001: The Atlantic Multidecadal Oscillation and its relationship to rainfall and river flows in the continental U.S., *Geophys. Res. Lett.*, 28: 2077-2080.
- Ermert, V., Fink A. H., Jones A. E. & A. P. Morse, 2011. Development of a new version of the Liverpool Malaria Model. I. Refining the parameter settings and mathematical formulation of basic processes based on a literature review. *Malaria Journal*, 10:35.
- 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.

Gadiaga, L., Machault, V., Pagès, F., Gaye, A., Jarjaval, F., Godefroy, L., Cissé, B., Lacaux, J-P., Sokhna, C., Trape, J-F., Rogier, C. 2011. Conditions of malaria transmission in Dakar from 2007 to 2010. Malar J, 10:312

Gao, B., 1996, NDWI - A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space: Remote Sensing of Environment, 58, no. 3, p:257-66.

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

Gillies, M.T., Coetzee, M.: *A supplement to the anophelinae of Africa south of the Sahara (Afrotropical region)*. The South African Institut for Medical Research No. 55 Johannesburg, South Africa; 1987.

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.

Huete, A.R., 1988, A soil-adjusted vegetation index (SAVI) : Remote Sensing of Environment, 25, no. 3, p. 295-309.

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, p. 66-74.

Lingenfelter, A., K. Rydzanicz, A. Kaiser, and N. Becker, 2010, Mosquito Fauna and Perspectives for Integrated Control of Urban Vector-Mosquito Populations in Southern Benin (West Africa): Annals of Agricultural and Environmental Medicine, v. 17, no. 1, p. 49-57.

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.

Knight, J. R., et al., 2005. A signature of persistent natural thermohaline circulation cycles in observed climate. Geophysical Research Letters, 32, L20708, doi:10.1029/2005GL024233.

Knutti R., Abramowitz G., Collins M., Eyring V., Gleckler P.J., Hewitson B. & L. Mearns, 2010. Good Practice Guidance Paper on Assessing and Combining Multi Model Climate Projections. In: Meeting Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Expert Meeting on Assessing and Combining Multi Model Climate Projections. IPCC Working Group I Technical Support Unit, University of Bern, Bern, Switzerland.

Machault, V., C. Vignolles, F. Pagès, L. Gadiaga, C. Sokhna, J-F. Trape, J-P. Lacaux and C. Rogier, (2010): Remotely sensed environmental data for the study of the spatial heterogeneity and the temporal evolution of malaria transmission risk in Dakar, Senegal: Malaria Journal, 9, p. 252

Machault, Vanessa (2010). 'Utilisation de données d'observation de la Terre par satellite pour l'évaluation des densités vectorielles et de la transmission du paludisme', thèse de l'Université de la Méditerranée, faculté de Médecine de Marseille, 159 pp.

Machault, V., F. Borchi, P. Vounatsou, F. Pagès, C. Vignolles, J-P. Lacaux and C. Rogier, (2011): The use of remotely sensed environmental data in the study of malaria, Geospatial Health, 5(2), p. 151-168

Machault, V., C. Vignolles, F. Pagès, L. Gadiaga, Y. M. Tourre, A. Gaye, C. Sokhna, J-F. Trape, J-P. Lacaux, and C. Rogier, (2012), Risk Mapping of Anopheles gambiae s.l. Densities Using Remotely-Sensed Environmental and Meteorological Data in an Urban Area: Dakar, Senegal, PLOS one, 7(11)

- McFeeters, S.K., 1996, The use of the normalised difference water index (NDWI) in the delineation of open water features: *International Journal of Remote Sensing*, 17, no. 7, p. 1425-32.
- 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.
- Mittal, P. K., 2003, Biolarvicides in vector control: challenges and prospects: *J.Vector Borne.Dis.*, v. 40, no. 1-2, p. 20-32.
- Muller, O., A. M. De, H. Becher, J. Tiendrebogo, 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. Tiendrebogo, 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.
- Paeth, M. et al. 2003, Global SST influence on twentieth century NAO variability. *Clim. Dyn.* 21,1, p. 63-75. DOI:10.1007/s00382-003-0318-4
- Paz, S. et al., 2008, Multitemporal climate variability over the Atlantic Ocean and Eurasia: linkages with Mediterranean and West African climate. *Atmos. Sc. Lett.*, 9, 4, p. 196 - 201.
- 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.
- Rouse, J.W., R.H.Hass, J.A.Schell, and D.W.Deering, 1973, Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS: Third "Earth Resources Technology Satellite" symposium, Vol. 1., Washington D.C.:NASA SP353.p. 309-317.
- 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.
- Salas y Mélia D., Chauvin F., Déqué M., Douville H., Guérémy J.F., Marquet P., Planton S., Royer J.F., Tyteca S. (2005) : Description and validation of CNRM-CM3 global coupled climate model. Note de centre GMGEC, CNRM, 103
- 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.

Su T, Mulla MS: Field evaluation of new water-dispersible granular formulations of *Bacillus thuringiensis* ssp. *israelensis* and *Bacillus sphaericus* against *Culex* mosquitoes in microcosms. *J. Am. Mosq. Control Assoc.* 1999, 15:356–365.

Tanser, F. C., B. Sharp, and D. le Sueur, 2003: Potential effect of climate change on malaria transmission in Africa. *The Lancet*, 362, 1792-1798.

Taylor K. E., Stouffer R. J. & G. A. Meehl, 2012. An overview of CMIP5 and the experiment design. *BAMS*, 485-498.

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.

Tourre, Y. M., Paz, S., and Kushnir, Y. (2010). Low-frequency climate variability in the Atlantic basin during the 20th century. *Atmos. Sci. Lett.*, 11, \3, p. 180–185.

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: *Geospatial Health*, 3(1), p. 69-79.

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

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.

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), p. 210-220.

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.

Xu, H., 2006, Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery: *International Journal of Remote Sensing* 27, no. 14:3015-33.

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.

Zhang, Y., J.M. Wallace and D.S. Battisti 1997: ENSO-like Interdecadal Variability: 1900-93. *J. of Clim.*,10, p. 1004-1020.

Zhang, R., and T. L. Delworth (2006), Impact of Atlantic multidecadal oscillations on India/Sahel rainfall and Atlantic hurricanes, *Geophys. Res. Lett.*, 33, L17712, doi:10.1029/2006GL026267.

ANNEXES

Annexe 1.Zone d'étude

NOM ZONE	NUM PHOTOS
DESCRIPTION DE LA ZONE (type de quartier, environnement global)	
NUMEROS GPS	

Annexe 2.Fiche collections d'eau et gîtes larvaires

NOM ZONE	JOUR	MOIS	NUM COLL		
HEURE	MINUTES	NUM PHOTOS			
TYPE ET DESCRIPTION DE LA COLLECTION			NUM GPS		
LONGUEUR (m)	LARGEUR (m)	DIAMETRE (m)	PROFONDEUR (cm)		
TYPE DE SOL		ODEUR	COULEUR DE L'EAU		
Boue / Terre / Sable / Goudron / Gravier		OUI / NON			
TEMPERATURE	pH	CONDUCTIVITE	TURBIDITE		
OMBRE	OUI / NON				
PAR QUOI ?		% OMBRE :			
INSECTICIDE					
QUOI ?	QUAND ?	OU ?	PAR QUI ?		
VEGETATION DE SURFACE		OUI / NON			
% Laitues	% Lentilles	% Nénuphars	% Mousse verte		
% Mousse blanche	% Plaques terre	% Algues	% Ordures		
% Roseaux	% Brins d'herbe	% Autre :	% Autre :		
FAUNE (Peu / Moy / Bcp)		OUI / NON			
Guppies (NON / PEU / MOY / BCP)	Têtards (NON / PEU / MOY / BCP)	Grenouilles (NON / PEU / MOY / BCP)	Punaises (NON / PEU / MOY / BCP)		
Notonectidae (NON / PEU / MOY / BCP)	Mollusques (NON / PEU / MOY / BCP)	Vers (NON / PEU / MOY / BCP)	Vers rouges (NON / PEU / MOY / BCP)		
Autres poissons (NON / PEU / MOY / BCP)	Libellules (NON / PEU / MOY / BCP)	Autre (NON / PEU / MOY / BCP)	Autre (NON / PEU / MOY / BCP)		
LARVES ANOPHELES		OUI / NON			
NOMBRE DE LOUCHES	Nb stade 1	Nb stade 2	Nb stade 3	Nb stade 4	Nb nymphes émergées
LARVES CULICIDES		OUI / NON			
NOMBRE DE LOUCHES	Nb stade 1	Nb stade 2	Nb stade 3	Nb stade 4	Nb nymphes émergées
COLLECTIONS ADDITIONNELLES					

NOM ZONE	JOUR	MOIS	NUM COLL
NUM GPS		NUM PHOTOS	
LONGUEUR (m)	LARGEUR (m)	DIAMETRE (m)	PROFONDEUR (cm)

Annexe 3.Fiche capture de moustiques adultes

NOM ZONE	
POSTE 1 (INTERIEUR)	
NUM GPS	NUM PHOTOS
DATE DEBUT	DATE FIN
DESCRIPTION	
POSTE 2 (EXTERIEUR)	
NUM GPS	NUM PHOTOS
DATE DEBUT	DATE FIN
DESCRIPTION	
POSTE 3 (EXTERIEUR)	
NUM GPS	NUM PHOTOS
DATE DEBUT	DATE FIN
DESCRIPTION	

Annexe 4. Article de Dambach et al (2012)

Dambach et al. *International Journal of Health Geographics* 2012, **11**:8
<http://www.ij-healthgeographics.com/content/11/1/8>



INTERNATIONAL JOURNAL
OF HEALTH GEOGRAPHICS

RESEARCH

Open Access

Utilization of combined remote sensing techniques to detect environmental variables influencing malaria vector densities in rural West Africa

Peter Dambach^{1*}, Vanessa Machault², Jean-Pierre Lacaux², Cécile Vignolles³, Ali Sié⁴ and Rainer Sauerborn^{5,1}

Abstract

Introduction: The use of remote sensing has found its way into the field of epidemiology within the last decades. With the increased sensor resolution of recent and future satellites new possibilities emerge for high resolution risk modeling and risk mapping.

Methods: A SPOT 5 satellite image, taken during the rainy season 2009 was used for calculating indices by combining the image's spectral bands. Besides the widely used Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) other indices were tested for significant correlation against field observations. Multiple steps, including the detection of surface water, its breeding appropriateness for *Anopheles* and modeling of vector imagines abundance, were performed. Data collection on larvae, adult vectors and geographic parameters in the field, was amended by using remote sensing techniques to gather data on altitude (Digital Elevation Model = DEM), precipitation (Tropical Rainfall Measurement Mission = TRMM), land surface temperatures (LST).

Results: The DEM derived altitude as well as indices calculations combining the satellite's spectral bands (NDTI = Normalized Difference Turbidity Index, NDWI Mac Feeters = Normalized Difference Water Index) turned out to be reliable indicators for surface water in the local geographic setting. While *Anopheles* larvae abundance in habitats is driven by multiple, interconnected factors - amongst which the NDVI - and precipitation events, the presence of vector imagines was found to be correlated negatively to remotely sensed LST and positively to the cumulated amount of rainfall in the preceding 15 days and to the Normalized Difference Pond Index (NDPI) within the 500 m buffer zone around capture points.

Conclusions: Remotely sensed geographical and meteorological factors, including precipitations, temperature, as well as vegetation, humidity and land cover indicators could be used as explanatory variables for surface water presence, larval development and imagines densities. This modeling approach based on remotely sensed information is potentially useful for counter measures that are putting on at the environmental side, namely vector larvae control via larviciding and water body reforming.

Keywords: Remote sensing, High spatial resolution, SPOT 5 satellite, Malaria, Rural West Africa, Burkina Faso, Geographic information system, Digital elevation model, MODIS, TRMM

* Correspondence: peter.dambach@web.de

¹Institute of Public Health, University of Heidelberg, Heidelberg, Germany
 Full list of author information is available at the end of the article



© 2012 Dambach et al; licensee BioMed Central Ltd. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/2.0>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Background

Malaria is still widespread in Western Africa and results in severe illness, death and hence in economic damage to households and national economy. The desirable overall use of countermeasures and strategies against malaria and its vector, such as use of bed nets, larviciding, habitat reduction etc., is still below the needed amount for showing a remarkable impact.

During the past two decades, remotely sensed data has been used to describe and predict geographical and temporal patterns in vector-borne disease transmission and disease prevalence [1-3]. The basic idea behind the remotely sensed assessment of malaria determinants is to define environmental parameters that can be used to identify areas with increased risk. One of the main goals of this approach could be the detection of breeding habitats or the mapping of vector densities through remote sensing techniques, while some other studies linked climate and environmental parameters directly to malaria prevalence [2,4-6]. The suitability of habitats for mosquito larvae breeding is dependent on the presence and distribution of specific environmental variables (*i.e.*, surface water, water related vegetation and distribution and amount of precipitation) [7]. Studies mapping *Anopheles* mosquito breeding habitats, transmission, or disease have been made in Africa [4,8-10] South and Central America [11-14] and Asia [15,16]. Reliable information about vector density and malaria transmission risk is essential for understanding variations in disease epidemiology and targeting intervention programs,

which are useful tools at the continental and national scales, but are less appropriate in a context of local-scale variations in disease patterns that often vary within a few kilometers distance. Nevertheless, high local variation in malaria epidemiology is particularly common in the Sahel region of Africa, where malaria is characterized by very focal and seasonal transmission [10,17-19].

In this paper we argue that, for the understanding of local malaria ecology on a high resolution scale, an integrated view on multiple influencing factors is helpful, comprising the following objectives:

1. To detect surface water and water-related land cover within the survey region.
2. To assign appropriateness for vector larvae breeding to those land cover types.
3. To investigate the influence of environmental and meteorological variables on larvae and adult vector abundance.
4. To predict the adult *Anopheles* densities in villages using those variables as well as the surrounding densities of larvae.
5. To validate the predicted vectorial risk using ground captured *Anopheles* mosquitoes.

Methods

The study site is located in the North-Western part of Burkina Faso in the Kossi district (Figure 1). The study region shows altitudes around 200 m with increasing elevations towards the West. The mean precipitation for

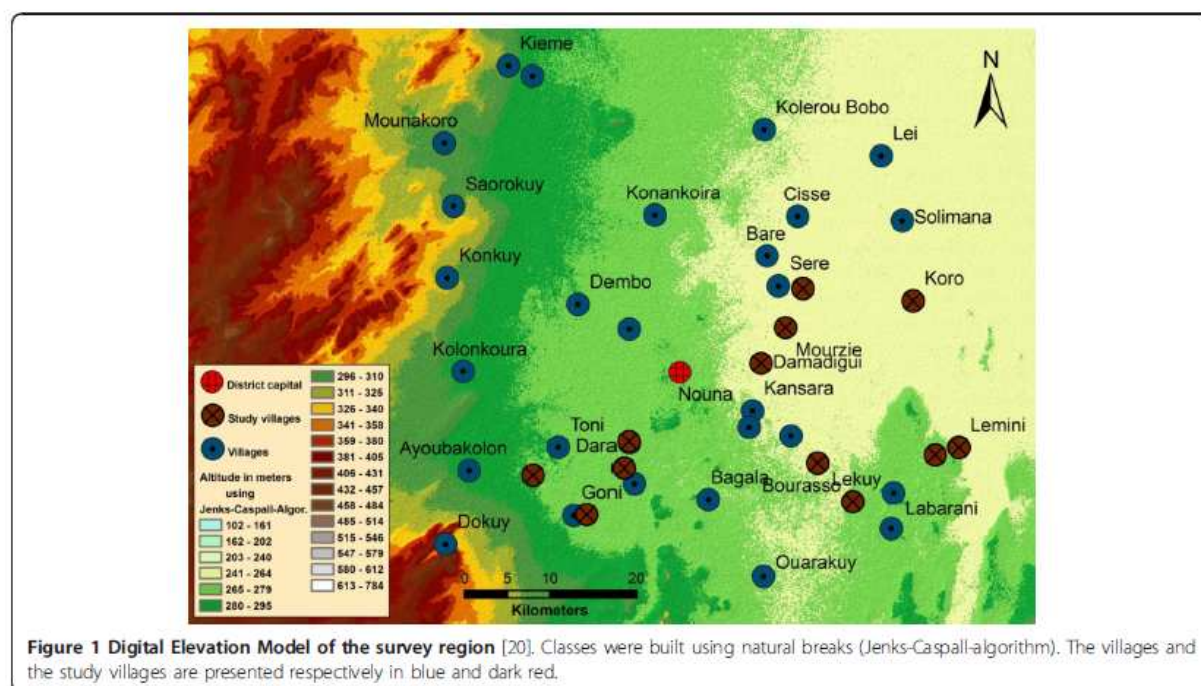


Figure 1 Digital Elevation Model of the survey region [20]. Classes were built using natural breaks (Jenks-Caspall-algorithm). The villages and the study villages are presented respectively in blue and dark red.

Nouna has been 817 mm per year over a period of the last ten years, with about 90% of annual rainfall during the rainy season (June to September). The monthly maxima during the rainy season can reach up to 350 mm. The yearly average temperature of Nouna is 27.8° C. The North Western savannah regions of Burkina Faso are a malaria holo-endemic area with a marked seasonality. The study took place between July and September 2009, in 12 villages of the region (amongst which 10 were covered by the SPOT-5 satellite scene).

Satellite images from the SPOT-5 (Satellite Pour l'Observation de la Terre) were programmed and acquired for October 12th 2009, during the rainy season. Data included three spectral bands at 2.5 m spatial resolution (green, red and near infrared - NIR). One band for the short wave infrared (SWIR) was also available at 10 m spatial resolution. The three first bands were upsampled to 10 m and stacked with the fourth 10 m band. All images were level 3 pre-processed (orthoimages), with map projection UTM zone 30 N, and datum WGS 84. In the center of the satellite scene, which was 60 × 60 km, the district capital Nouna is located at 12° 44' N; 3° 51' W.

A Digital Elevation Model (DEM) at 90 m spatial resolution was available from the Shuttle Radar Topography Mission (SRTM version 4.1) [20,21]. It was resampled at 10 m spatial resolution.

Weekly day and night Land Surface Temperatures (LST) were extracted from MODIS (Moderate Imaging Spectroradiometer) images at 1 km spatial resolution for the full duration of the field work. The freely available MODIS Reprojection Tool [22] was used to extract LST values and to project the resulting images. The weekly LSTs were averaged for the survey region.

The TRMM (Tropical Rainfall Measurement Mission) daily data at 25 km spatial resolution were downloaded for the duration of the survey period including an additional month, for calculating the cumulated precipitations within different time lags before larvae and adult mosquito captures respectively.

The data analysis was based on the conceptual approach of tele-epidemiology developed by CNES, the French Space Agency [23] i.e. i- assembling and analyzing multidisciplinary in-situ datasets to identify the main biological and physical mechanisms at stake in order to highlight the main factors implied in the diseases spatial and temporal distribution; ii- remote-sensing monitoring of environment linking the disease with the parameters previously identified with the aim to obtain well adapted products from space; iii- modeling to generate predictive environmental risk maps (Figure 2). This methodology has been previously applied successfully for the Rift Valley Fever in North Senegal [24,25] and for urban malaria in Dakar [26,27]. The basic requirement for malaria to occur is the presence of the vector, *Anopheles*. The

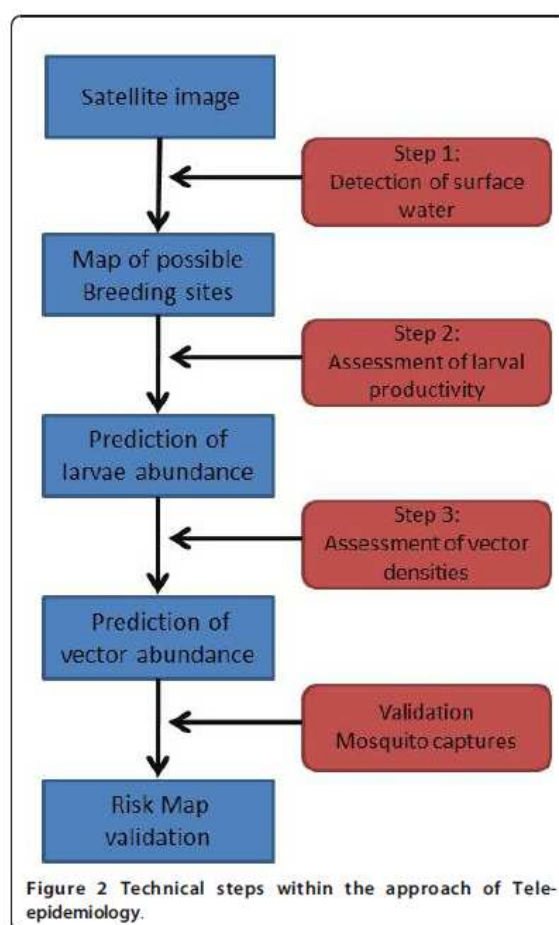


Figure 2 Technical steps within the approach of Tele-epidemiology.

abundance of larvae and adults is directly linked to the presence, distribution and persistence of water bodies (puddles, ponds...). Based on this knowledge, the first step of this present study was the detection of surface water (hereafter called step 1). The second part (hereafter called step 2) analyzed the environmental parameters in and around the water collections, that could be related to larvae presence and abundance, and the third step (hereafter called step 3) aimed at identifying the relationships between the predicted larval production, the environmental and meteorological information with the ground recorded *Anopheles* densities, representing a risk indicator for human population.

A Geographic Information System was built in ArcGIS 9.3, containing all remotely sensed and field data. All environmental information was extracted at 10 m pixel level or at village level and transferred into Stata 12 (Stata Corporation, College Station, Texas) for statistical modeling. Multiple indices combining different spectral bands were calculated from the SPOT-5 images using

Table 1 Different indices combining different spectral bands were tested for statistical association with presence of surface water in step 1 and for correlation with larvae abundance in step 2

Index	Calculation
NDVI [29] Normalized Difference Vegetation Index	$\frac{NIR - red}{NIR + red}$
SAVI [30] Soil Adjusted Vegetation Index	$\frac{NIR - red}{NIR + red} * (1 + L)$
NDPI [24] Normalized Difference Pond Index	$\frac{SWIR - green}{SWIR + green}$
NDWI Gao [31] Normalized Difference Water Index Gao	$\frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR}$
NDWI Mac Feeters [32] Normalized Difference Water Index Mac Feeters	$\frac{green - NIR}{green + NIR}$
MNDWI Mac Feeters [33] Modified NDWI Mac Feeters	$\frac{green - SWIR}{green + SWIR}$
NDTI [24] Normalized Difference Turbidity Index	$\frac{red - green}{red + green}$

NIR near infrared; *SWIR* short wave infrared

the band math functionality in ENVI 4.7 (Table 1) and tested for statistical association with the presence of surface water, *Anopheles* larvae and imagines abundance according to the three steps above. Land Use and Land Cover (LULC) from a supervised land cover classification were available from a previous study [28].

Step 1: Mapping of surface water

Outlines of pools and ponds (locally called “marigots”), in which continuous larvae sampling was performed, were mapped using a GPS device, and transferred to the GIS. Points, further called presence points, were

generated in the center of all 10 m pixels that were overlaid by the shape of a water body, even for small areas. Additional points, called absence points, were randomly generated outside of the pools. A total of 482 presence points and 1978 absence points were created. The values of every indicator, as well as the LULC class and the altitude (from the DEM) were extracted at every presence and absence point. The linearity of the relationship between the outcome and each explanatory variable was assessed, except for the elevation that has been included as dichotomous variable. Logistic regressions were fitted to identify the remotely sensed environmental variables significantly associated with the presence/absence of water at each point. The inversion of the best multivariate model allowed generating a 10 m resolution map of the probabilities of presence of water in the studied area.

Step 2: Mapping of *Anopheles* larvae

Mosquito larvae at all stages were collected daily from September 2nd to October 23rd 2009 in the 12 study villages (2 villages per day with a weekly repetition (Figure 3)). Within and around the villages, the follow-up concerned the most common habitats, *i.e.* the ponds that ranged in size from several meters to hundred meters in diameter. A standardized dipper with 200 ml volume was used to collect larvae.

For each potential breeding site, the environment was taken into account as a mean of the remotely sensed ecological variables computed in and around the water bodies (10 m ring). This scale allowed taking into account the surface (*e.g.* surface cover as vegetation) and nearby structures (*e.g.* shade) on potential habitats that could have an impact on the larval presence and density. Meteorological data was tested at different temporal scales until finding the best statistical association with the larvae presence. The linearity of the relationship between the outcome and each explanatory variable was tested.

A negative binomial regression was fitted to identify those remotely sensed environmental and meteorological variables significantly associated with larval density recorded in each water body at each date. The sampling scheme implied that some correlations could exist between observations obtained in a same water collection since repeated observations could be influenced by similar environmental factors. Yet, the basic requirement for using classical statistics is the independence of observations and neglecting autocorrelations in the analysis may result in overestimation of the strength of the associations. Thus, a pond random effect was added to the models, to account for variables related to the water collection environment that could be significant determinants of the larvae abundance but would not have

**Figure 3** Installation of a mosquito light trap and giving instructions to an operator in charge for trap surveillance.

been measured in the study. The environmental indicators found to be statistically associated with the *Anopheles* larval density were computed and fed back into the GIS, in and around every pond predicted at step 1 of the study in order to predict larvae abundance for the whole study area.

Step 3: Mapping of adult *Anopheles*

In the 12 villages where the larvae collection took place, adult mosquitoes were captured using light traps. During 9 weeks from September to November 2009 villages were visited within the same time schedule as for the larvae collection, with a repetition period of 6 days. Depending on village accessibility, data was available from 5 to 7 visits. Each day, in 2 villages in the same region light traps were installed. In each village 3 places were chosen where a light trap was placed inside and outside a house respectively. Those pairs of light traps were installed in a distance of approximately 100 m from each other to detect possible local differences in vector abundance between different places within one village. The traps inside the houses were installed near the sleeping places if equipped with an untreated bed net, the traps outside were put beside the house within the common patio, where people stay in the evenings (Figure 3). Light traps were connected to the batteries at 6 pm and disconnected and closed at 6 am. All mosquitoes caught in the light traps were transported to the research centers laboratory for species and gender determination.

The linearity of the relationship between the outcome and each explanatory variable was verified. Then, a negative binomial regression with a village random effect was fitted to predict the density of adult *Anopheles* caught in each village (mean of all the traps) at each date of the ground work using remotely sensed environmental and meteorological predictive variables, as well as larval densities predicted in step 2. As the sampling scheme implied that some correlations could exist between observations from the same village, a random effect was added at the village level.

To predict the adult *Anopheles* densities in non-surveyed villages for every day of the study period, the environmental indicators that were found to be statistically associated with the adult *Anopheles* density were computed in buffers of 500 m around the villages, in accordance with the flight range of emerged mosquitoes from their breeding habitat [34-36].

Results

Step 1: Mapping of surface water

A description of the distribution of the remotely-sensed variables used at this step is presented in Table 2. Significant correlations were found in uni- and multivariate

analysis between the NDWI Mac Feeters (Normalized Difference Water Index), the NDTI (Normalized Difference Turbidity Index) and the DEM (Digital Elevation Model) amongst 2,460 observations of the presence/absence of ponds at 10 m pixel level (Table 3). The DEM shows differences in altitude between study villages of about 100 m (Figure 1). Even if the contrast of mean elevation between presence and absence points was low, a significant association was highlighted between a low elevation and an increased probability for the presence of ponds. While the NDWI Mac Feeters was positively correlated with the presence of environmental surface water, the NDTI was found to be a protective factor.

Predictions of the probability for the presence of ponds allowed to calculate the area under the ROC (receiver operating characteristic) curve at 0.99 (95% confidence interval: 0.99 - 1.00). The ROC curve is a visualization of the sensitivity, or true positive rate, vs. false positive rate for a binary classifier system whose discrimination threshold is varied. The inversion of the model and the extrapolation for the whole study area allowed generating a map of the probability of presence of water bodies. The application of a cut-off value on those probabilities provided a raster map of the presence/absence of water at 10 m spatial resolution. The filtering (closing filter) and vectorization allowed transforming those maps into maps of ponds. A total of 4,600 water bodies were detected which sizes ranged from 100 to about 5,000 m².

Table 2 Description of the quantitative remotely-sensed explicative variables associated with the presence of ponds

Variable	n observations = 2460	Water present	Water absent
		n = 482	n = 1978
NDTI	Range	-0.25; -0.01	-0.26; 0.05
	Mean and 95% CI	-0.14 [-0.15; -0.15]	-0.10 [-0.10; -0.09]
	25-50-75 percentiles	-0.20; -0.13; -0.10	-0.13; -0.09; -0.06
NDWI Mac Feeters	Range	-0.19; 0.42	-0.39; 0.11
	Mean and 95% CI	0.12 [0.11; 0.14]	-0.17 [-0.18; -0.17]
	25-50-75 percentiles	0.03; 0.13; 0.25	-0.21; -0.17; -0.14
Elevation in meters	Range	253; 292	253; 292
	Mean and 95% CI	266 [266; 267]	268 [268; 269]
	25-50-75 percentiles	262; 265; 267	261; 268; 274

Table 3 Environmental factors significantly associated with the presence of ponds in the 10 meter pixels

		Logistic regression				
		Univariate **			Multivariate	
Number of obs. = 2460	Coef.	95% CI*	p-value	Coef.	95% CI*	p-value
NDTI						
Per unit increase	-16.80	-18.91 - -14.69	< 0.0001	-38.81	-43.63 - -28.00	< 0.0001
NDWI Mac Feetters						
Per unit increase	34.26	30.55 - 37.98	< 0.0001	43.55	38.54 - 48.77	< 0.0001
Elevation						
Inferior to 270 m	1			1		
Superior or equal to 270 m	-1.03	-1.26 - -0.79	< 0.0001	-1.57	-2.22 - -0.92	< 0.0001

* 95% confidence interval

** Only the variables significantly associated in the multivariate model
Logistic regression**Step 2: Mapping of *Anopheles* larvae**

The *Anopheles* larvae presence/absence (164 observations positive for larvae and 3 negative) and the larval density were recorded during September-November 2009. A total of 16 ponds were digitized in the GIS. All the observations associated with those 16 collections were included in the analysis, for a total of 73 observations. Description of the distribution of the remotely-sensed and meteorological variables used at this step is provided in Table 4. Results of the environmental and meteorological determinants of the *Anopheles* larval density recorded during the field work are presented in Table 5.

Those variables significantly associated with the larval density in multivariate analysis were the mean of the NDVI in and around the ponds and the current night Land Surface Temperature (night LST). The NDVI was negatively associated whereas the LST was positively associated with the *Anopheles* larval density in ponds.

The results of the likelihood ratio test ($p < 0.001$) showed that the random effect model was significantly different from a model fitted without accounting for the pond effect. Predictions of the larval densities for each observation allowed the calculation of Spearman correlation with the observed densities at 0.55, showing medium correlation between the tested variables. Daily maps were drawn by inverting the global model predicting the *Anopheles* larval density for each water collection detected at step 1, for the full duration of the follow-up. Those maps were used as basis of step 3.

Step 3: Mapping of adult *Anopheles*

During the study period, 99% of the *Anopheles* caught in the traps were *Anopheles gambiae* s.l. and 1% *Anopheles funestus*. For both species, 89% of caught mosquitoes were female, 11% were male. The total larval production (surface water predicted in step 1 multiplied by the larval density predicted in step 2 for a given date) in the

Table 4 Description of the quantitative remotely-sensed and meteorological explicative variables associated with *Anopheles* larval densities in ponds

Variable		<i>Anopheles larval density*</i> < 28	<i>Anopheles larval density*</i> >= 28 and < 47	<i>Anopheles larval density*</i> >= 47 and < 82	<i>Anopheles larval density*</i> >= 82
	n observations = 73	n = 17	n = 19	n = 18	n = 19
NDVI (mean within pond + 10 m ring)	Range	-0.02; 0.21	-0.12; 0.30	-0.12; 0.30	-0.12; 0.30
	Mean and 95% CI	0.07 [0.04; 0.11]	0.09 [0.04; 0.14]	0.04 [-0.01; 0.10]	0.01 [-0.04; 0.05]
	25-50-75 percentiles	0.00; 0.05; 0.13	0.00; 0.05; 0.21	-0.01; 0.04; 0.05	-0.05; 0.00; 0.05
Night LST (weekly mean for the survey area) in °C	Range	20.5; 23.1	20.5; 23.1	20.5; 23.1	21.2; 23.1
	Mean and 95% CI	21.4 [21.0; 21.8]	22.0 [21.6; 22.4]	21.9 [21.5; 22.3]	22.5 [22.2; 22.7]
	25-50-75 percentiles	20.5; 21.1; 21.9	21.1; 22.1; 22.6	21.1; 21.9; 22.7	21.9; 22.6; 23.0

* Larval density = number of larvae per sample (8 dips per pond per date). Categories were chosen following quantiles.

Table 5 Meteorological and environmental factors associated significantly with *Anopheles* larval density in ponds

Negative binomial regression with pond random effect							
		Univariate **			Multivariate		
Number of obs. = 73	Number of ponds = 16	Coef.	95% CI *	p-value	Coef.	95% CI *	p-value
NDVI (mean within pond + 10 m ring) Per unit increase		-2.64	-4.93 - -0.34	0.024	-3.20	-5.36 - -1.03	0.004
Night LST (weekly mean for the survey area) Per °C increase		0.33	0.18 - 0.48	< 0.0001	0.36	0.21 - 0.50	< 0.0001

* 95% confidence interval

** Only the variables significantly associated in the multivariate model

Negative binomial regression with pond random effect

buffers around the villages was not significantly associated with the number of *Anopheles* caught in the traps. None of the LULC classes extracted from the supervised classification was associated with the adult densities. Nevertheless, other environmental (NDVI) and meteorological (day LST and rainfall amount) factors were significantly associated with the adult densities (Tables 6 and 7). On the basis of the multivariate negative binomial regression, adult *Anopheles* predictions for the 10 study villages covered by the SPOT image were made for all capture dates between September 2nd and October 23rd 2009. The comparison with actual values is presented in Figure 4. Figure 5 is the prediction map of *Anopheles* vector densities for October, 1st, 2009, for the 37 villages included in the SPOT-image outline.

Discussion

The present study allowed drawing predictive high-resolution risk maps for malaria vector abundance in a rural area following three modeling steps: the detection of water bodies, the larvae abundance in those water bodies and the adult *Anopheles* densities in villages. In the multivariate models for all three study steps, there was more than one relevant influencing factor for the presence of surface water as well as for *Anopheles* larvae and imagines. Due to the close interweavement of factors influencing the surface water presence and vector larvae and imagines abundance, the number of used and combined techniques is comparably higher than in studies that focus on a single step, e.g. detection of appropriate larval habitats or prediction of vector density.

Table 6 Description of the quantitative remotely-sensed and meteorological explicative variables associated with the adult *Anopheles* densities in villages

Variable		<i>Anopheles</i> adult density* < 110	<i>Anopheles</i> adult density > = 110 and < 145	<i>Anopheles</i> adult density > = 145 and < 240	<i>Anopheles</i> adult density > = 240
	n observations = 55	n = 12	n = 15	n = 14	n = 14
NDVI (mean in 500 m buffer around study villages)	Range	0.06; 0.13	0.06; 0.13	0.06; 0.13	0.06; 0.13
	Mean and 95% CI	0.09 [0.07; 0.10]	0.08 [0.08; 0.09]	0.08 [0.07; 0.09]	0.09 [0.08; 0.10]
	25-50-75 percentiles	0.07; 0.08; 0.09	0.07; 0.09; 0.10	0.07; 0.08; 0.08	0.08; 0.09; 0.10
Day LST(weekly mean for the survey area) In °C	Range	27.0; 33.0	26.2; 33.0	23.1; 30.6	23.1; 27.7
	Mean and 95% CI	29.9 [29.0; 30.9]	29.6 [28.8; 30.4]	26.9 [25.6; 28.2]	24.5 [23.8; 25.3]
	25-50-75 percentiles	29.5; 29.8; 30.4	28.7; 30.0; 30.3	24.4; 27.7; 28.7	23.5; 23.8; 25.4
Rainfall amount (sum during 15 preceding days for each village) In mm	Range	22.1; 92.0	15.3; 147.4	22.1; 168.4	38.1; 220.2
	Mean and 95% CI	55.2 [39.6; 70.8]	51.9 [34.0; 69.7]	91.2 [64.3; 118.2]	145.7 [114.8; 176.6]
	25-50-75 percentiles	36.6; 46.5; 78.7	25.6; 38.1; 73.6	41.2; 83.3; 131.2	131.3; 148.8; 175.3

Table 7 Meteorological and environmental factors associated with adult *Anopheles* abundance in Nouna region in September-November 2009

	Negative binomial regression with village random effect					
	Univariate			Multivariate		
Number of obs. = 55 (Nights with mosquito captures) Number of villages = 10	Coef.	95% CI *	p-value	Coef.	95% CI *	p-value
NDPI (mean in 500 m buffer around study villages)						
Per unit increase	6.01	-1.36 - 13.38	0.110	7.52	0.77 - 14.27	0.029
Day LST (weekly mean for the survey area)						
Per °C increase	-0.16	-0.19 - -0.12	< 0.0001	-0.16	-0.20 - -0.12	< 0.0001
Rainfall amount (sum during 15 preceding days for each village)						
Per 10 mm increase	0.06	0.04 - 0.08	< 0.0001			NS

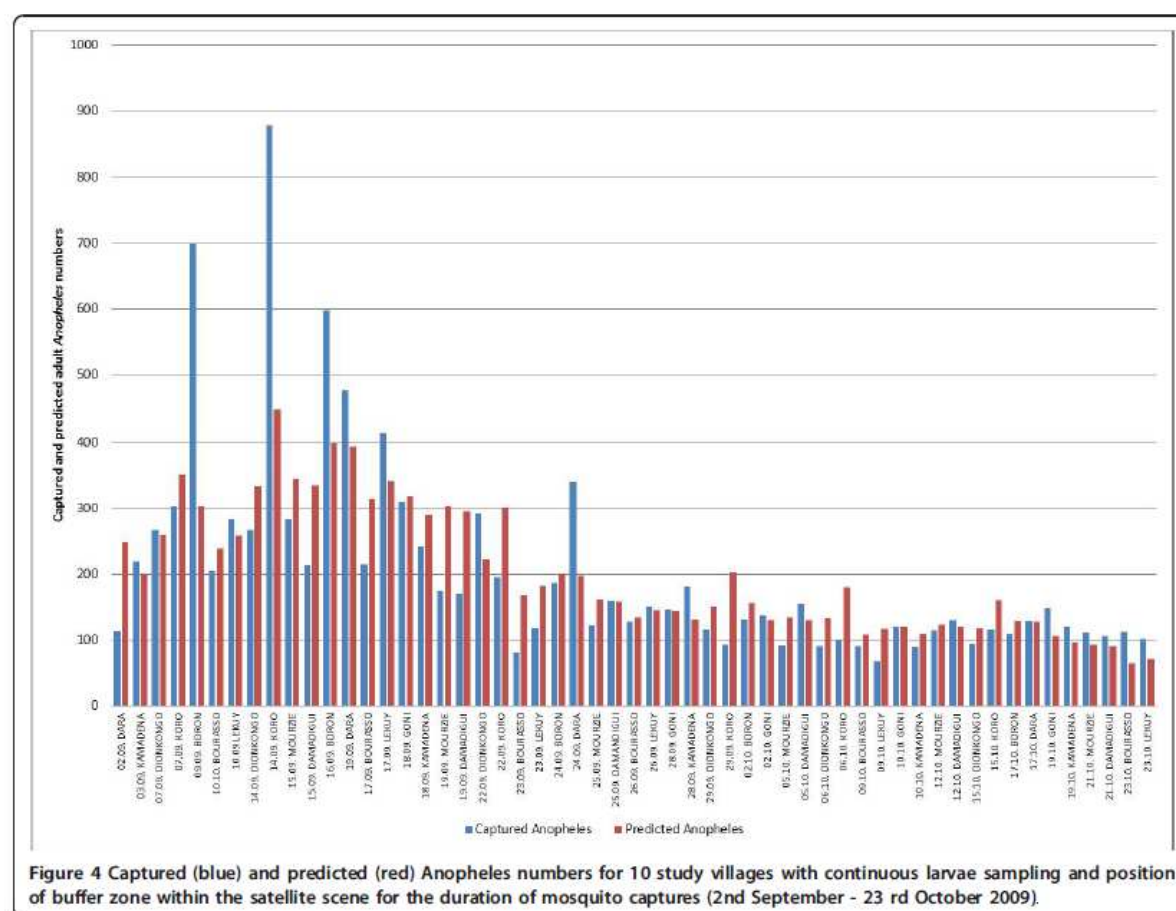
* 95% confidence interval

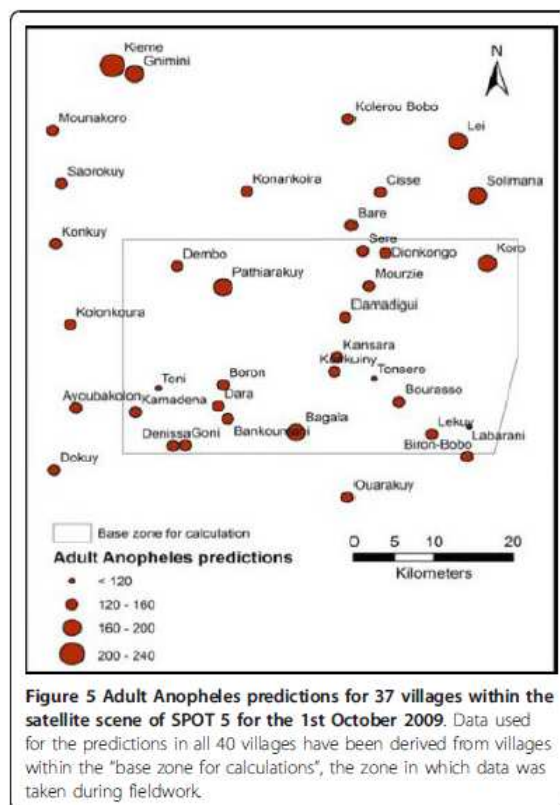
Binomial negative regression with village random effect. Univariate and multivariate analysis

Step 1: Mapping of surface water

The digital elevation model turned out to be an indicator for surface water presence and swampy areas even in the survey region's setting with little differences in local altitudes, while from survey regions that are more

heterogeneous and hilly this correlation and even its influence on malaria parasite prevalence has already been stated [37]. The NDWI Mac Feeters was positively correlated with the presence of water, in line with the fact that it is an indicator that increases with open





water presence, having been previously used for water detection [26,27]. The NDTI, initially designed to describe water turbidity, increases when water bodies become muddy and have spectral reflectance similar to bare soils [24] so it was logically negatively associated with the presence of water.

The smallest pond recorded on the ground covered one 10 m pixel so the direct water detection - using indices thresholds coupled with photointerpretation [24,25] - was not appropriate. Indeed, it is commonly stated that object detection is feasible only when the object size is at least 1.5 times larger than the pixel size. Instead, statistical modelling allowed to benefit from several remotely sensed data sources that could be put together to predict the probability of presence of ponds. This methodology already proved to be efficient for detection of small *Anopheles* breeding sites in urban settings [27]. The pixels that were predicted as belonging to water bodies were grouped into water collections as single objects, as it has been done in the North of Senegal for the mapping of ponds harbouring larvae for Rift Valley Fever vectors [24,25]. Indeed, important predictors that could further be related to the presence of

larvae, such as shade around the collection, were water body-related. In consequence, they had to be mapped at the level of the water collection and not at the pixel-level.

Step1 took advantage of the availability of a high resolution SPOT image that was acquired at the time of the field collections and that allowed to predict the presence of relatively small ponds recorded on the ground. As the image was taken during the rainy season, maximum water collections were predicted, that could further be weighted depending on the season. Even at 90 m spatial resolution, the DEM provided useful information for mapping the surface water and it should be expected that a DEM with an increased spatial resolution would improve the prediction by highlighting small altitude contrasts.

Step 2: Mapping *Anopheles* larvae

The findings were generally in line with the findings of other studies but show some particularities due to the very high resolution remote sensing approach. The NDVI at this scale turned out to be a hindering factor for larval production in contrast to most studies that utilize satellite imagery at a lower scale [38-40]. As far as the authors are aware, this correlation is unique to this study but may be reverse if changing towards a different scale. In the present study, the NDVI could have been a proxy of shade on the water collection or surface vegetation that are both usually related to lower *Anopheles* larval densities [41-43]. In consequence, the negative association between NDVI and the larval density was coherent with the biological mechanisms of larval development already highlighted in ground studies.

The night LST during the ground prospecting days was significantly positively related to the *Anopheles* larval densities in the water collections. In breeding sites, the entire development cycle from egg to the emerging imago can be completed under favorable conditions. This cycle's duration can vary between 1 and 3 weeks, depending on water and air temperatures, assuming sufficient food availability. Its length shortens with temperature increase [44] in accordance with the observation that LST was significantly positively associated with the density of larvae. Night LST showed stronger correlation than day temperature, probably due to the decreased impact of solar radiation and a more representative portrait of the average water temperature.

The cumulated rainfall during the 15 days preceding the day of larvae collection was positively associated with the low/high densities of larvae (results not shown) in univariate analysis. Rainfall patterns steer the availability of surface water for mosquito larvae breeding. In this study, only flooded water collections were included, so rainfall was already taken into account by definition.

Nevertheless, the amount of rainfall could be a proxy for the persistence of water bodies, providing sufficient time for larvae to develop. On the other hand, rainfall might be a surrogate variable for global larval productivity within a region.

Step 2 benefited from the high spatial resolution of the SPOT image and the high temporal resolution of the meteorological data. Indeed, rainfall and temperature were taken into account at coarse spatial resolution (village and study area levels) which was consistent with scales of the meteorological heterogeneity. Nevertheless, the daily or weekly repetition of data was necessary for evaluating the evolutions of local conditions favourable for larvae development.

Step 3: Mapping adult *Anopheles*

The multivariate model predicting the *Anopheles* adult densities at the village level included an environmental and a meteorological variable, which allowed recording of a spatial (using NDPI in 500 m buffers around the villages) effect that differed between villages and a temporal effect (using weekly LST).

The NDPI was correlated with the number of captured mosquitoes. Increasing values for the NDPI characterize the presence of mixed pixels that show both, water and vegetation. The presence of this mixed environment can be seen as an ideal prerequisite for emerging imagines to rest. In consequence, the NDPI was logically associated positively with the *Anopheles* adult densities.

As a meteorological factor, night LST was not significantly associated with the adult mosquito density whereas day LST was negatively associated. The higher the day LST, the lower the number of mosquitoes caught, which may indicate higher environmental stress, making it more difficult to survive or search for blood meal. Higher day LSTs in this region also go hand-in-hand with a lower relative humidity, especially during the rainy season. Lower environmental air humidity is less appropriate for mosquitoes survival [45] and blood meal retrieval success [46].

The cumulative amount of rainfall in the 15 preceding days was significantly positively correlated with the adult *Anopheles* density in univariate analysis. This is likely to be explained by the increased number and extended outlast of larval habitats. It can also be an indicator of humid air conditions that favors adult mosquito survival.

The prediction for larval densities in environmental habitats within the buffer zone around mosquito capture points (500 m) was not significantly correlated with the imagines abundance. In extrapolating the prediction models for water collections and larval densities to

assess adult *Anopheles* densities, some errors were accepted, such as follows.

- Randomly created points for the absence of surface water did possibly fall to some extent into zones that were covered with water or had high soil humidity. In consequence, the map of water collection could have been biased. Here, a more detailed study of the situation around the study villages would be needed, with the collection of ground absence points (*i.e.* absence of water).
- The quality of the validation of the prediction of larval densities with actual ground values was moderate, larger field dataset collections may improve the accuracy of the models.
- Working with a single satellite image, the positions and in particular the dimensions of ponds and other surface water were static and did not take into consideration the possible change in circumference after rainfalls or longer periods of continuous evaporation. The acquisition of several images could improve this point, as well as the modeling of the size of the ponds depending on rainfall amount and distribution as it has been done in North Senegal [25].
- Step 2 was undertaken to model larval densities, as no multivariate model could have been adjusted to predict the presence/absence of larvae. In consequence, the water collections that were not breeding sites could have been misclassified.

Ground entomological data

The field work undertaken in the Nouna region in the 2009 rainy season showed that most of the *Anopheles* caught in traps were *An. gambiae* s.l. that are known to be vectors for malaria. In consequence, risk maps drawn in the present study, may be seen as basis information for malaria risk mapping as the location of the vector's larval habitats and their dynamics are the primary determinants of the spatial and temporal distribution of malaria transmission. Then, in addition to this entomological approach, it should be emphasized that malaria transmission occurs only if a competent infected vector meets a sensitive human population; if a *Plasmodium* reservoir is present.

Data was collected from September to November, the period representing the peak and outgoing rainy season. Onset of precipitations is volatile during the last years but usually starts in June. The adult vector abundance, and with some delay malaria transmission find their peak around September. In consequence, the risk predicted in the present study can be seen as the maximum annual entomological malaria risk. Even given the much

lower malaria transmission during more than 6 months due to drastically reduction of environmental habitats and rainfall, an extended future study including more survey month could allow to better understand the year round vector dynamics. Still little is known about the vector resting places during dry season and the process of re-emergence in rainy season.

Only the ponds have been followed-up in and around the study villages while small water collections that are known to be seasonally productive breeding sites of *An. gambiae s.l.* were not included for logistical reasons. It is argued that the larval productivity recorded at pond level may have been a surrogate evaluation of the total productivity in the villages. Nevertheless, it cannot be excluded that the lack of association between larval and adult densities may partly rely on this partial sampling. In addition, the use of light traps to catch adult mosquitoes may have biased the estimates of vector densities - e.g. depending on the density [47] and have introduced noise that could also explain the absence of significant association between the larval and adult densities.

In general, differences in vector abundance between villages may not only be subject to environmental, but also anthropogenic variables. Within the study area, there were no vector control interventions performed during the study year and the use of bed nets was equally distributed. In consequence, no bias was introduced when evaluating entomological figures.

Conclusion

Remotely sensed environmental and meteorological data allowed the prediction of water presence in the region of Nouna, as well as the dynamic prediction of *Anopheles* larval and adult densities. While high resolution satellite data provided possibilities for spatial mapping of vector abundance, the amount and regional distribution of precipitations and the temperature are the drivers for vector development; the temporal component of the risk model. The results of the present study could be seen as the basic element of a dynamic system aiming at facilitating real-time monitoring of human health in rural Burkina Faso. The derived risk maps may keep validity for several years up to a decade, since the geographic factors change only within small limits. Having ground truth data on the region's characteristic environmental features, the extension of this approach to neighboring regions should be possible with a significantly reduced need for preparatory fieldwork. With the acquisition of additional satellite images and weather data, predictions on vector abundance for bordering areas can be performed. For usage in additional regions, the techniques appliance can be probably performed with drastically decreased costs due to the omission of extensive fieldwork components.

Acknowledgements

The SPOT-5 images are provided by the ISIS program from CNES. The project is supported by the French Ministry of Ecology (MEDDTL) through its program GICC (Gestion et Impacts du Changement Climatique). We are deeply grateful to the people in the study villages for their cooperation and to the local staff of CRSN for their valuable work.

Author details

¹Institute of Public Health, University of Heidelberg, Heidelberg, Germany. ²Observatoire Midi Pyrénées/Laboratoire d'Aérodologie, Toulouse, France. ³Centre National d'Etudes Spatiales (CNES), Toulouse, France. ⁴Centre de Recherche en Santé de Nouna, Nouna, Burkina Faso. ⁵Centre for Global Health Research, Umeå University, Umeå, Sweden.

Authors' contributions

PD contributed to the conception and the design of the study, collected the field data and contributed to the analysis and interpretation of the data and to the writing of the paper. VM contributed to the study design, the analysis and interpretation of the data and wrote the paper. JPL contributed to the conception and the design of the study and the interpretation of the data. CV contributed to the analysis and interpretation of the data. AS contributed to the conception and the design of the study. RS contributed to the conception and the design of the study. All authors read and approved the final manuscript.

Competing interests

The authors have not received any funding or benefits from industry to conduct this study.

Received: 3 January 2012 Accepted: 23 March 2012

Published: 23 March 2012

References

- Rogers DJ, Randolph SE, Snow RW, Hay SI: **Satellite imagery in the study and forecast of malaria.** *Nature* 2002, **415**:710-715.
- Machault V, Vignolles C, Borch F, Vouatsou P, Pages F, Briolant S, et al: **The use of remotely sensed environmental data in the study of malaria.** *Geospat. Health* 2011, **5**:151-168.
- Beck LR, Lobitz BM, Wood BL: **Remote sensing and human health: new sensors and new opportunities.** *Emerg Infect Dis* 2000, **6**:217-227.
- Craig MH, Snow RW, le Sueur D: **A climate-based distribution model of malaria transmission in sub-Saharan Africa.** *Parasitol Today* 1999, **15**:105-111.
- Snow RW, Craig MH, Deichmann U, le Sueur D: **A preliminary continental risk map for malaria mortality among African children.** *Parasitol Today* 1999, **15**:99-104.
- Ceccato P, Connor SJ, Jeanne I, Thomson MC: **Application of geographical information systems and remote sensing technologies for assessing and monitoring malaria risk.** *Parasitologia* 2005, **47**:81-96.
- Clarke KC, McLafferty SL, Tempalski BJ: **On epidemiology and geographic information systems: a review and discussion of future directions.** *Emerg Infect Dis* 1996, **2**:85-92.
- Djuk-Wasser MA, Bagayoko M, Sogoba N, Dolo G, Toure MB, Traore SF, et al: **Mapping rice field anopheline breeding habitats in Mali, West Africa, using Landsat ETM + sensor data.** *Int J Remote Sens* 2004, **25**:359-376.
- Hay SI, Snow RW, Rogers DJ: **Predicting malaria seasons in Kenya using multitemporal meteorological satellite sensor data.** *Trans R Soc Trop Med Hyg* 1998, **92**:12-20.
- Thomas CJ, Lindsay SW: **Local-scale variation in malaria infection amongst rural Gambian children estimated by satellite remote sensing.** *Trans R Soc Trop Med Hyg* 2000, **94**:159-163.
- Beck LR, Rodriguez MH, Dister SW, Rodriguez AD, Rejmankova E, Ullao A, et al: **Remote-sensing as a landscape epidemiologic tool to identify villages at high-risk for malaria transmission.** *Am J Trop Med Hyg* 1994, **51**:271-280.
- Beck LR, Rodriguez MH, Dister SW, Rodriguez AD, Washino RK, Roberts DR, et al: **Assessment of a remote sensing-based model for predicting malaria transmission risk in villages of Chiapas, Mexico.** *Am J Trop Med Hyg* 1997, **56**:99-106.
- Rejmankova E, Roberts DR, Pawley A, Manguin S, Polanco J: **Predictions of adult anopheles-albimanus densities in villages based on distances to remotely-sensed larval habitats.** *Am J Trop Med Hyg* 1995, **53**:482-488.

14. Roberts DR, Paris JF, Manguin S, Harbach RE, Woodruff R, Rejmankova E, *et al*: Predictions of malaria vector distribution in Belize based on multispectral satellite data. *Ann Trop Med Hyg* 1996, **54**:304-308.
15. Adimi F, Soebiyanto RP, Sali N, Kiang R: Towards malaria risk prediction in Afghanistan using remote sensing. *Malaria Journal* 2010, **9**:125-136.
16. Charoenpanyanet A, Chen X: Satellite-based modeling of Anopheles mosquito densities on heterogeneous land cover in Western Thailand. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 2008, **37**:159-164.
17. Briet OJT, Dossou-Yovo J, Akodo E, van de Giesen N, Teuscher TM: The relationship between Anopheles gambiae density and rice cultivation in the savannah zone and forest zone of Cote d'Ivoire. *Trop Med Int Health* 2003, **8**:439-448.
18. Diuk-Wasser MA, Toure MB, Dolo G, Bagayoko M, Sogoba N, Sissoko I, *et al*: Effect of rice cultivation patterns on malaria vector abundance in rice-growing villages in Mali. *Am J Trop Med Hyg* 2007, **76**:869-874.
19. Robert V, Gazin P, Carnevale P: Malaria transmission in three sites surrounding the area of Bobo Dioulasso (Burkina Faso): The savanna, a rice field and the city. *Bull Soc Vector Ecol* 1987, **12**:41-43.
20. Shuttle Radar Topography Mission. 2011 [<http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>].
21. Jarvis A, Reuter HI, Nelson A, Guevara E: Hole-Filled Seamless SRTM data V4. International Centre for Tropical Agriculture (CIAT); 2008.
22. Land Processes DAAC: MODIS Reprojection Tool User's Manual. 2011.
23. Marechal F, Ribeiro N, Lafaye M, Guell A: Satellite imaging and vector-borne diseases: the approach of the French National Space Agency. *Geospatial Health* 2008, **3**:1-5.
24. Lacaux JP, Tourre YM, Vignolles C, Ndiou JA, Lafaye M: Classification of ponds from high-spatial resolution remote sensing: Application to Rift Valley Fever epidemics in Senegal. *Remote Sens Environ* 2006, **106**:66-74.
25. Vignolles C, Lacaux JP, Tourre YM, Biegeard G, Ndiou JA, Lafaye M: Rift Valley fever in a zone potentially occupied by Aedes vexans in Senegal: dynamics and risk mapping. *Geospat Health* 2009, **3**:211-220.
26. Machault V, Gadilaga L, Vignolles C, Jarjavall F, Bouzid S, Sokhna C, *et al*: Highly focused anopheline breeding sites and malaria transmission in Dakar. *Malaria Journal* 2009, **8**:138-159.
27. Machault V: Utilisation de données d'observation de la terre par satellite pour l'évaluation des densités vectorielles et de la transmission du paludisme. Marseille: Université de la méditerranée, Thèse de doctorat, Faculté de médecine de Marseille; 2010.
28. Dambach P, Sie A, Lacaux JP, Vignolles C, Machault V, Sauerborn R: Using high spatial resolution remote sensing for risk mapping of malaria occurrence in the Nouna district, Burkina Faso. *Glob Health Action* 2009, **2**, doi:10.3402/gha.v2i0.2094.
29. Rouse JW, Hass RH, Schell JA, Deering DW: Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS 1973, 309-317.
30. Huete AR: A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sens Environ* 1988, **25**:295-309.
31. Gao B: NDWI - A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sens Environ* 1996, **58**:257-266.
32. McFeeters SK: The use of the normalised difference water index (NDWI) in the delineation of open water features. *Int J Remote Sens* 1996, **17**:1425-1432.
33. Xu H: Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *Int J Remote Sens* 2006, **27**:3015-3033.
34. Cho S-H, Lee H-W, Shin E-H, Lee H-I, Lee W-G, Kim C-H, *et al*: A mark-release-recapture experiment with Anopheles sinensis in the northern part of Gyeonggi-do, Korea. *Kor J Parasitol* 2002, **40**:139-148.
35. Ejercito A, Urbino M: Flight range of gravid and newly emerged Anopheles. *Bulletin of the World Health Organisation* 1951, **4**:663-671.
36. Quraishi MS, Esghi N, Faghili MA: Flight range, lengths of gonotrophic cycles, and longevity of P-32-labeled Anopheles stephensi mysorensis. *J Econ Entomol* 1966, **59**:50-55.
37. Balls MJ, Bodker R, Thomas CJ, Kisinza W, Msangeni HA, Lindsay SW: Effect of topography on the risk of malaria infection in the Usambara Mountains, Tanzania. *Trans R Soc Trop Med Hyg* 2004, **98**:400-408.
38. Rogers DJ: Satellite imagery, tsetse and trypanosomiasis in Africa. *Prev Vet Med* 1991, **11**:201-220.
39. Thomson MC, Connor SJ: Environmental information systems for the control of arthropod vectors of disease. *Med Vet Entomol* 2000, **14**:227-244.
40. Tourre YM, Jarlan L, Lacaux JP, Rotela CH, Lafaye M: Spatio-temporal variability of NDVI-precipitation over southernmost South America: possible linkages between climate signals and epidemics. *Environmental Research Letters* 2008, **3**:1-9.
41. Gillies MT, Coetzee M: A supplement to the anophelinae of Africa south of the Sahara (Afrotropical region). Johannesburg: The South African Institute for Medical Research; 1987, 55.
42. Gimnig JE, Ombok M, Kamau L, Hawley WA: Characteristics of larval anopheline (Diptera: Culicidae) habitats in western Kenya. *J Med Entomol* 2001, **38**:282-288.
43. Matthys B, N'Goran EK, Kone M, Koudou BG, Vounatsou P, Cisse G, *et al*: Urban agricultural land use and characterization of mosquito larval habitats in a medium-sized town of Cote d'Ivoire. *J Vector Ecol* 2006, **31**:319-333.
44. Bayoh MN, Lindsay SW: Effect of temperature on the development of the aquatic stages of Anopheles gambiae sensu stricto (Diptera: Culicidae). *Bull Entomol Res* 2003, **93**:375-381.
45. Pampana E: A Textbook of Malaria Eradication. London: Oxford Publishing; 1969.
46. Takken W, Dekker T, Wijnholds YG: Odor-mediated flight behavior of Anopheles gambiae Giles Sensu Stricto and A-stephensi Liston in response to CO2, acetone, and 1-octen-3-ol (Diptera: Culicidae). *J Insect Behav* 1997, **10**:395-407.
47. Mbogo CN, Glass GE, Forster D, Kabiru EW, Githure JI, Ouma JH, *et al*: Evaluation of light traps for sampling anopheline mosquitoes in Kilifi, Kenya. *J Am Mosq Control Assoc* 1993, **9**:260-263.

doi:10.1186/1476-072X-11-8

Cite this article as: Dambach *et al*: Utilization of combined remote sensing techniques to detect environmental variables influencing malaria vector densities in rural West Africa. *International Journal of Health Geographics* 2012 **11**:8.

Submit your next manuscript to BioMed Central and take full advantage of:

- Convenient online submission
- Thorough peer review
- No space constraints or color figure charges
- Immediate publication on acceptance
- Inclusion in PubMed, CAS, Scopus and Google Scholar
- Research which is freely available for redistribution

Submit your manuscript at
www.biomedcentral.com/submit

