



GICC APR 2008 – N° subvention G.2100049724

AdaptFVR
Impacts du changement climatique sur l'émergence des vecteurs de la Fièvre de la Vallée du Rift au Sénégal : adaptation et stratégie pour une meilleure gestion du pastoralisme au Sahel



Synthèse du rapport final
Septembre 2012



ASPECTS ADMINISTRATIFS ET OBJECTIFS DES RECHERCHES

ASPECTS ADMINISTRATIFS

Date d'engagement : 18 FEVRIER 2010

Montant du budget : 175.000 euros

Cofinancements obtenus : CNES 50 k euros sur 2 ans (25 k euros / an) pour le traitement d'imagerie spatiale et le développement de chaîne de production de carte de risque.

Participants au projet :

Responsable scientifique du projet :

CNES, Centre National d'Etudes Spatiales, 18 Avenue Edouard Belin, 31401 TOULOUSE Cedex 9

Noms et organismes des autres partenaires scientifiques bénéficiaires

- **CSE Centre de Suivi Ecologique de Dakar**, chargé de la coordination des activités au Sénégal, responsable des activités liées à l'environnement
- **DSV : Direction des Services Vétérinaires du Ministère de l'Elevage du Sénégal**, responsable des activités liées à l'adaptation, utilisateur des bulletins ZPOM
- **IPD : Institut pasteur de Dakar**, responsable des activités liées à l'entomologie et à la validation des bulletins ZPOM,
- **Météo France**, responsable des activités liées à la climatologie
- **Association REFLETS**, responsable du site d'information RedGems

MOTS CLES : Changement climatique, climat, adaptation, stratégie, pastoralisme, maladies infectieuses à vecteurs, fièvre de la vallée du Rift, Sénégal, Sahel, régionalisation, incertitude

OBJECTIFS DES RECHERCHES

Le projet **AdaptFVR** propose d'appliquer l'approche conceptuelle de télé-épidémiologie reliant climat, environnement et santé, à la maladie d'intérêt, la Fièvre de la Vallée du Rift (FVR), dans la région sahélienne du Ferlo au Sénégal. La proposition est d'étudier l'impact de la variabilité du climat sur le schéma épidémiologique de la FVR et d'en analyser les conséquences sur les prévisions du risque vectoriel.

L'objectif est triple :

- produire et valider des cartes dynamiques des risques d'exposition du bétail aux piqûres des moustiques, vecteurs de la FVR,
- étudier l'impact de la variabilité du climat (du saisonnier jusqu'aux basses fréquences, comprenant les tendances et les changements climatiques) sur la prévision du risque vectoriel,
- étudier les processus d'adaptation dans la gestion du pastoralisme, principalement la santé animale, face aux risques prédits.

I. - II. PRESENTATION DES TRAVAUX ET ACQUIS EN TERMES DE TRANSFERT

INTRODUCTION

La Fièvre de la vallée du Rift (FVR), sujet de l'étude proposée, est devenue aujourd'hui l'une des plus préoccupantes parmi la quarantaine d'arboviroses émergentes ou ré-émergentes. Elle est considérée comme un problème de santé publique majeur ayant un impact socio-économique très important dans les régions où elle sévit. L'émergence de la FVR correspond à la conjonction dans le temps et dans l'espace de trois phénomènes (i) la prolifération des vecteurs (moustiques *Aedes vexans* et *Culex poicillipes*) dépendantes de conditions climatiques, principalement la pluviométrie et environnementales (ii) la circulation du virus (iii) la rencontre des vecteurs infectés et du bétail (hôte).

Le Centre national d'études spatiales (CNES) a développé un concept qui repose sur une approche déterministe des relations climat-environnement-santé et sur une offre spatiale originale et réellement adaptée (CNES, 2008). L'approche conceptuelle est basée sur l'étude des mécanismes favorisant l'apparition et la propagation de maladies infectieuses à vecteurs en reliant plusieurs disciplines telles que : les sciences de l'environnement, du climat, l'entomologie, l'ornithologie, la microbiologie, la télédétection...

Elle comprend trois étapes :

Etape 1 : appréhender et comprendre les mécanismes d'émergence et de propagation des vecteurs. Cette première étape consiste à établir expérimentalement les mécanismes qui relient les paramètres physiques, biologiques et socio-économiques associées à l'émergence des vecteurs. L'objectif est d'identifier les conditions favorables au développement de la maladie et de mieux comprendre les mécanismes de transmission et de prolifération. Cette étape passe par une phase d'observation et une phase de diagnostic.

Phase d'observation : la campagne de mesures effectuée en 2010 dans la région du Ferlo au Sénégal (figure 1) a permis de recueillir des données multidisciplinaires in-situ (entomologie des vecteurs responsables de la maladie, relations hôtes-vecteurs, virologie, données environnementales y compris des données météorologiques...).

Phase de diagnostic : elle a pour but d'extraire et d'identifier les principaux mécanismes en jeu et les paramètres environnementaux et climatiques observables par satellite favorisant l'émergence et la dispersion des vecteurs.

Etape 2 : production de produits spatiaux adaptés. Cette étape doit s'appliquer à répondre aux critères spécifiques d'une maladie définis lors de l'étape de compréhension des processus régissant cette maladie. Elle a donc pour objectif de créer et/ou d'utiliser des produits spatiaux réellement adaptés. Les images satellites apportent des informations qui ne concernent pas directement les pathogènes/virus responsables de la maladie, mais leur environnement (données géographiques, météorologiques, hydrologiques...) et notamment les lieux favorisant leur développement et leur prolifération. Cette étape consiste à identifier quels types de données satellitaires répondent le mieux aux besoins (résolution spatio-temporelle, spectrale) puis de créer les produits d'information adaptés. Dans le cas de la FVR les produits satellitaires concernent principalement la détection des mares temporaires et de leurs caractéristiques impliquées dans l'émergence des moustiques (couverture en végétation et turbidité des mares). La dynamique spatio-temporelle des mares nécessite des données satellitaires de pluviométrie et des séries d'images haute résolution SPOT et TerraSARX. La détection de l'emplacement des parcs à animaux nécessite également l'utilisation d'imagerie métrique. Les produits élaborés sont validés sur le terrain par les utilisateurs.

Etape 3 : élaboration de modèles prédictifs. Cette troisième étape nécessite le recours à la modélisation bio-mathématique des dynamiques épidémiques (quantification du risque vectoriel dans notre cas), intégrant les processus de transport impliqués: agent pathogène, vecteurs et hôtes, environnement physique et socio-économique. Cette étape comprend notamment le développement de systèmes d'informations sur la santé. L'objectif final est la mise en place de systèmes d'alerte précoce (SAP) permettant de prévoir le risque vectoriel et ainsi de prendre les mesures d'adaptation susceptibles de prévenir les épidémies.

MATERIELS ET METHODES

Les campagnes de mesures ont eu lieu pendant la saison des pluies 2010, de juin à décembre, dans une zone de 15km x 15km sur le village de Barkedji.

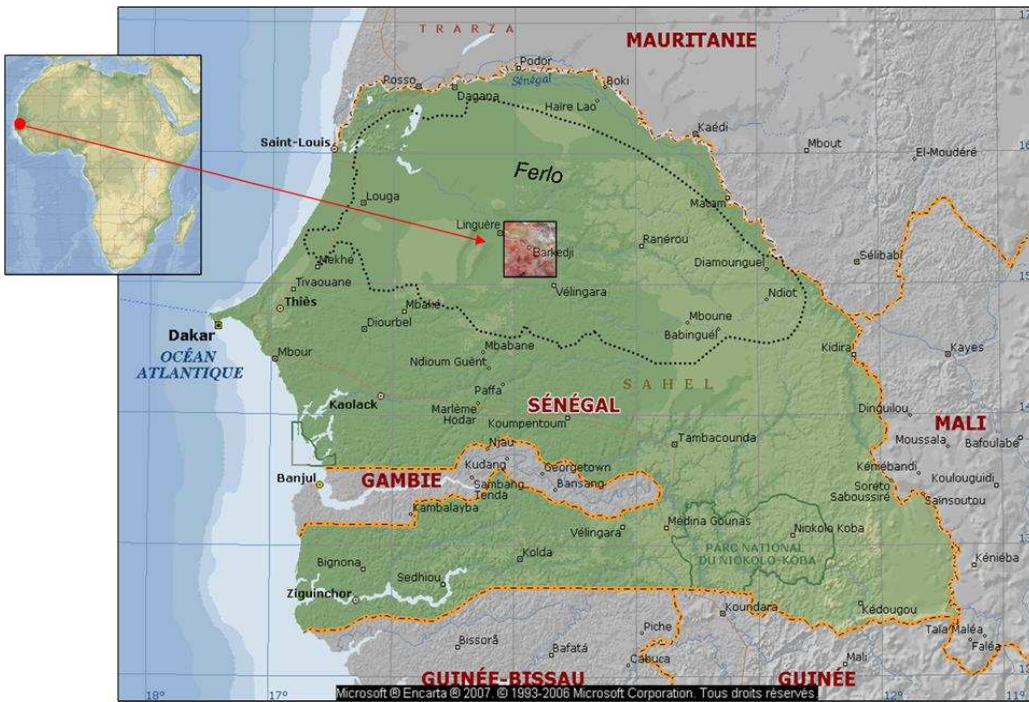


Figure 1 : Localisation de la zone d'étude (carré rouge) : Barkedji, Ferlo au Sénégal

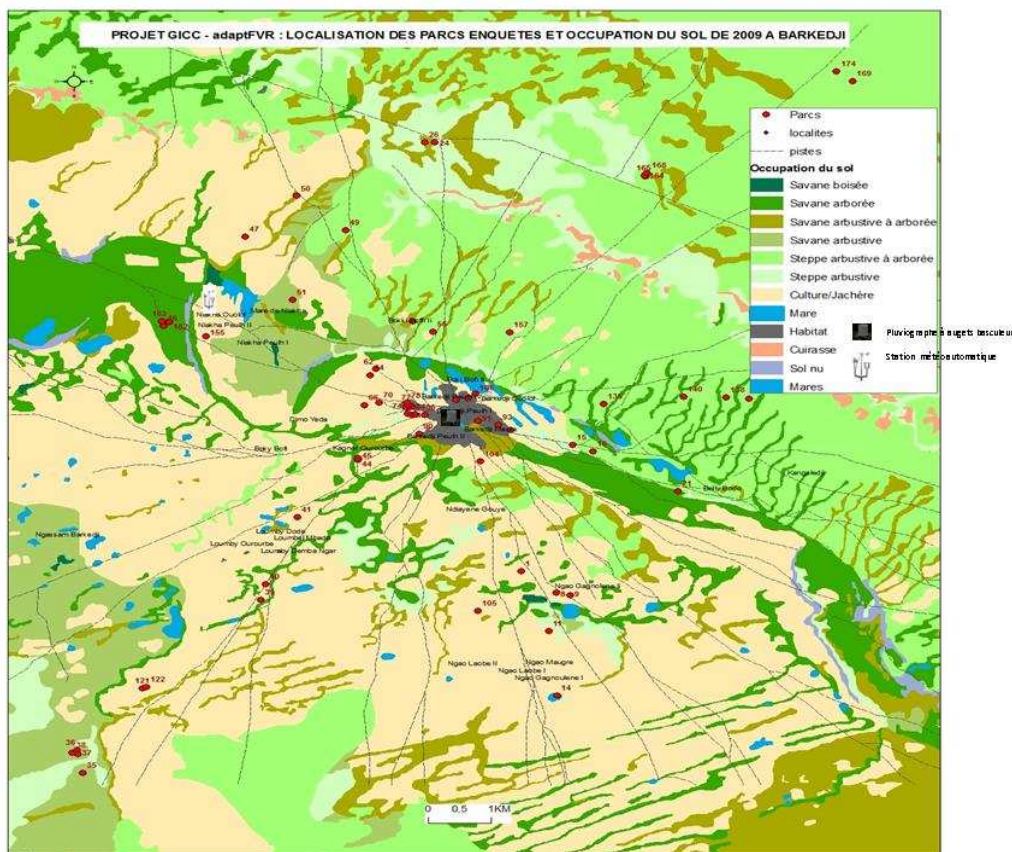


Figure 2: carte d'occupation du sol et de localisation des parcs à bestiaux enquêtés au cours de la saison des pluies 2010, dans la région de Barkedji, Ferlo au Sénégal

Les principales mesures effectuées en 2010 sont :

- en entomologie : les campagnes de mesures entomologiques réalisées par l'IPD ont permis de choisir 80 campements/parcs à bestiaux (bovins et petits ruminants, permanents ou transhumants) en tenant compte de leur distance par rapport aux mares. 6 échantillonnages ont été réalisés au

cours de la saison (figure 2). Les moustiques ont été récoltés au moyen de pièges lumineux de type CDC avec CO₂. Les moustiques ont été identifiés morphologiquement. L'origine du sang des femelles gorgées a été déterminée par la méthode ELISA ;

- en virologie : les campagnes de mesures de virologie réalisées par la DSV ont permis de suivre des troupeaux sentinelles (bovins et petits ruminants). 3 missions de suivi ont été effectuées entre juin et décembre 2010 ;
- en environnement : les mesures environnementales effectuées par le CSE concernent la collecte des données climatiques, hydrologiques et agrostologiques. Les données pluviométriques sont collectées grâce à des pluviographes installés près des mares des villages de Barkedji et de Niakha ;
- en pastoralisme : des questionnaires ont été conçus par le CSE avec l'appui de la DSV, et renseignés auprès des éleveurs transhumants (itinéraire et période de transhumance)(figure 5) ;
- en télédétection : 6 images SPOT5 10m et 2,5m ont été acquises entre juin et décembre 2010, à raison d'une acquisition par mois.

RESULTATS

L'ensemble du projet, de son organisation et de ses résultats est présenté sur le site www.redgems.org.

Les principaux résultats obtenus compte tenu des objectifs du projet sont synthétisés ci-après.

Objectif 1 : produire et valider des cartes dynamiques des risques d'exposition du bétail aux piqûres des moustiques, vecteurs de la FVR.

Pour atteindre cet objectif, nous sommes passés par deux étapes :

Etape 1 : appréhender et comprendre les mécanismes d'émergence des vecteurs

- Entomologie: un total de 12 714 femelles a été recueilli par l'IPD. Les vecteurs impliqués dans la transmission du virus de la FVR représentent 82% du total collecté, avec une prédominance des *Aedes vexans* (58%) et des *Culex poicilipes* (13%). Plus on s'éloigne des mares, plus la densité moyenne des moustiques diminue. Après l'émergence massive des *Aedes vexans* qui a suivi la mise en eau des mares en juillet, la densité totale des moustiques diminue en août. On mesure ensuite un second pic en septembre, avant de décliner progressivement jusqu'à la fin de la saison des pluies. La densité de *Culex poicilipes* a augmenté régulièrement à partir de juillet pour atteindre un pic en septembre suivi d'une décroissance régulière jusqu'à la fin de la saison des pluies (figure 3).

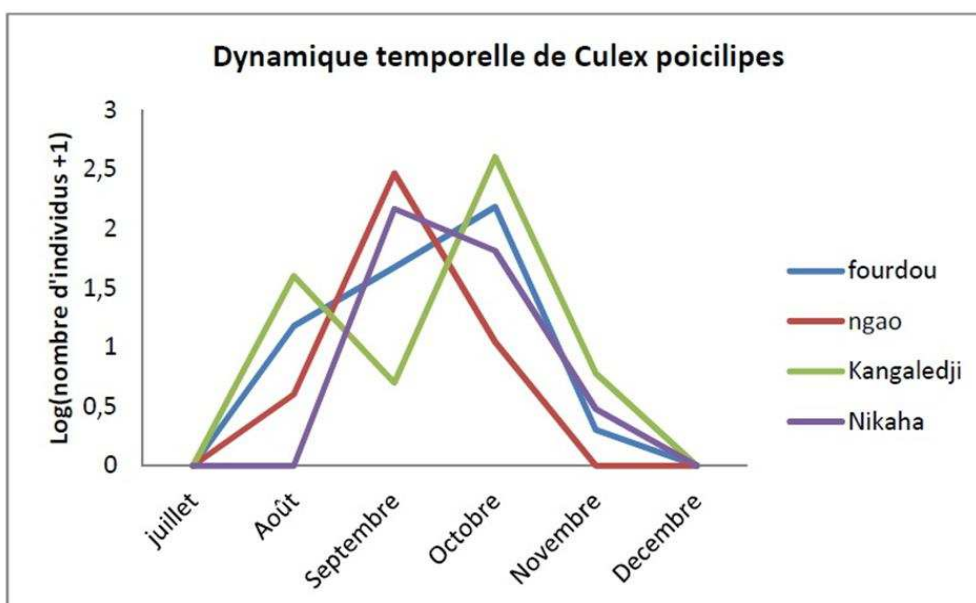


Figure 3: Dynamique temporelle de la densité des *Culex poicilipes* au niveau de 4 mares en 2010

- Virologie: Durant la campagne 2010, la DSV a collecté 1129 échantillons de sérum, dont 127 sérums de bovins et 1002 sérums de petits ruminants. Certains marqueurs sanguins permettent d'avoir des informations concernant une circulation ancienne du virus, et la naïveté des troupeaux vis-à-vis de la maladie : les IgG.

Les marqueurs sanguins, IgG représentatifs d'une circulation ancienne du virus, et les IgM représentatifs d'une contamination récente ont été analysés par l'IPD. Tous ces tests se sont révélés négatifs indiquant qu'il n'y a pas eu de circulation ancienne ou récente du virus de la FVR dans cette région en 2010.

- Environnement:

- **Météorologie :** La pluviométrie dans la région est plutôt normale, avec un début tardif (fin juin au lieu de début juin), le maximum des pluies est intervenu en août, et le cumul pluviométrique saisonnier est compris entre 400mm (Niakha) et 450mm (Barkedji).
- **Hydrologie :** le suivi limnimétrique de plusieurs mares montre que leur dynamique est liée à la distribution des événements pluviométriques. Il faut noter une mise en eau tardive des mares (figure 4)



Figure 4 : mise en eau de la mare de Niakha après la pluie de 24,6 mm (photo prise le 12/07/2010 à 17h45). La mise en eau est encore partielle en ce début de saison des pluies 2010 ; on peut voir que l'argile gonflante qui se trouve au fond de la mare est toujours craquelée, ce qui témoigne encore de l'insuffisance de l'humidité en début de saison des pluies.

- **Enquêtes pastorales :** Thomas Manga, chef de service vétérinaire de Barkedji, pense que la transhumance peut être considérée comme précoce au regard des autres années, avec une légère augmentation des flux de petits ruminants et de bovins. En revanche, le flux des dromadaires, en provenance de Mauritanie, est en nette augmentation depuis plusieurs années.

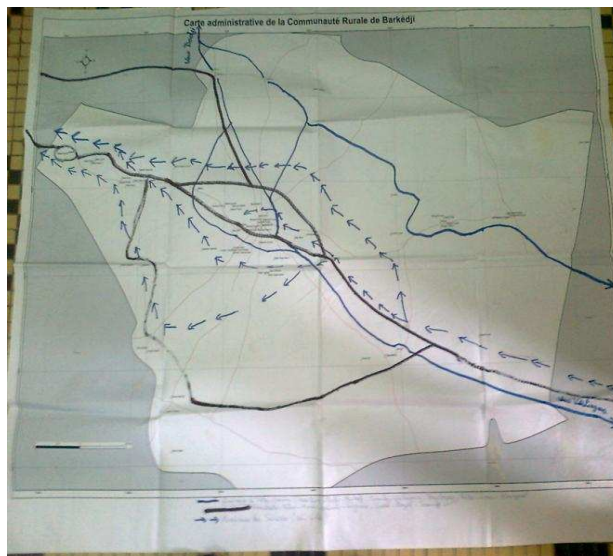


Figure 5 : Itinéraires de la transhumance au niveau de la Communauté Rurale de Barkédji découlant d'une cartographie participative avec les pasteurs durant les enquêtes sur le pastoralisme au cœur de la saison des pluies 2010. Les flèches en bleu montrent les itinéraires des pasteurs transhumants sèrères. Les traits pleins bleus et noirs indiquent d'autres itinéraires généralement employés par les pasteurs peulh.

- **Téledétection:** Le projet AdaptFVR a bénéficié des acquis des études précédentes dont la mise au point d'indices dédiés à la détection des mares et de la caractérisation de leur couvert végétal, ainsi que l'utilisation de données satellites TRMM pour connaître la quantité de pluie moyenne tombée (une donnée essentielle pour la dynamique des mares et la production des moustiques). Les images acquises ont permis d'actualiser la carte de localisation des mares, et, grâce à la très haute résolution, d'y localiser les parcs qui accueillent les troupeaux et de construire la carte d'occupation du sol (figure 2). Ces informations sont des entrées déterminantes du modèle bio-mathématique ZPOM.

Etape 2 : production de produits spatiaux adaptés et élaboration de modèles prédictifs.

L'approche conceptuelle de télé-épidémiologie du Cnes (CNES, 2008 ; Tourre et al. 2009 ; Vignolles, 2010) appliquée à la Fièvre de la Vallée du Rift (FVR) dans la région du Ferlo au Sénégal au cours de la saison 2003 a permis de produire des cartes dynamiques de risque d'exposition du bétail aux vecteurs de la FVR en associant comme facteurs déclenchant les événements pluvieux, la densité des vecteurs (*Aedes vexans* et *Culex poicillipes*) et la présence des hôtes que représentent le bétail (Tourre et al, 2009, Vignolles et al, 2009). Une carte de risque est en fait le résultat du croisement entre la carte d'aléas (densité de moustiques) et la carte de vulnérabilité (carte des campements et parcs à bestiaux). La carte d'aléas est calculée en tenant compte (i) de la distribution des événements de pluie (fréquence et intensité) qui conditionnent la mise en eau et la dynamique des mares (gîtes larvaires) ainsi que l'éclosion des œufs des moustiques (ii) de la distance de vol des moustiques (iii) de leur agressivité (nombre de moustiques qui piquent) (Tourre et al. 2008 ; Ndione et al 2009a et b). Cette dernière est aussi appelée carte des Zones Potentiellement Occupées par les Moustiques (ZPOM).

La méthodologie appliquée en 2003 a posteriori, a été utilisée cette fois dans le but de produire ces cartes d'aléas en temps quasi-réel pendant toute la saison des pluies 2010 dans la région de Barkédji au Sénégal (Vignolles et al. 2010, Tourre et al, 2010). Durant la saison 2010, 8 bulletins ont été produits et diffusés aux partenaires du projet.

La compréhension des mécanismes impliqués dans l'émergence des deux espèces de moustiques vecteurs de la FVR a permis d'améliorer le modèle de production des *Aedes vexans*, et de développer le modèle de production des *Culex poicillipes*. Les sorties de ces modèles ont pu être validées grâce aux données collectées lors des campagnes entomologiques et environnementales de terrain.

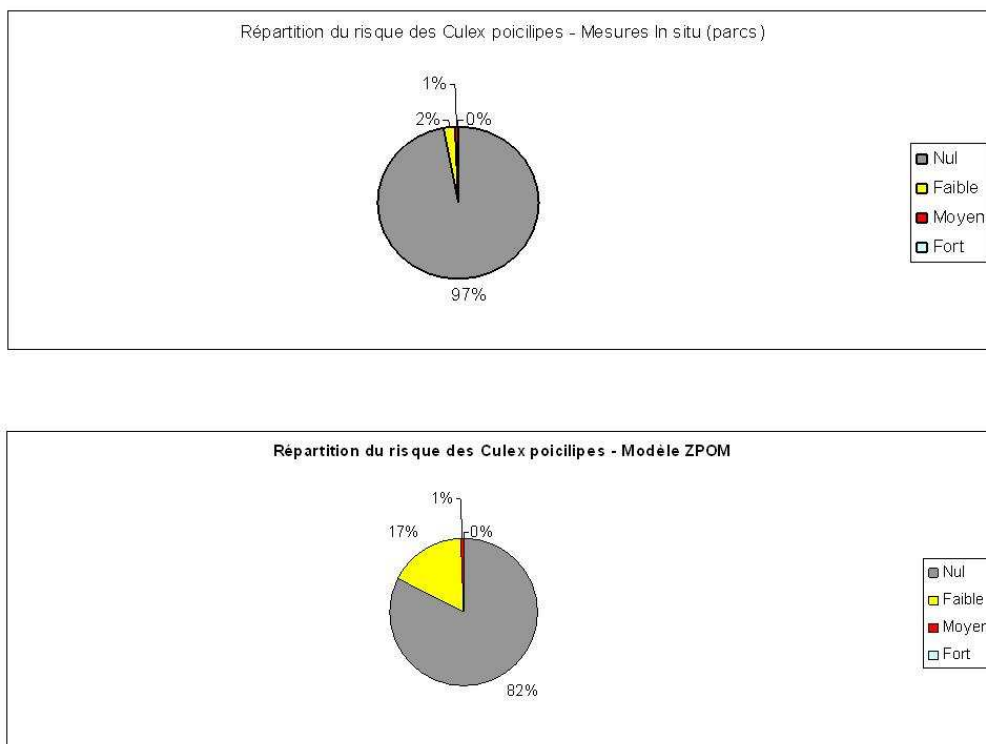


Figure 6 : comparaison du niveau de risque des *Culex poicillipes* entre mesures in-situ et sorties du modèle ZPOM (mare de Niakha)

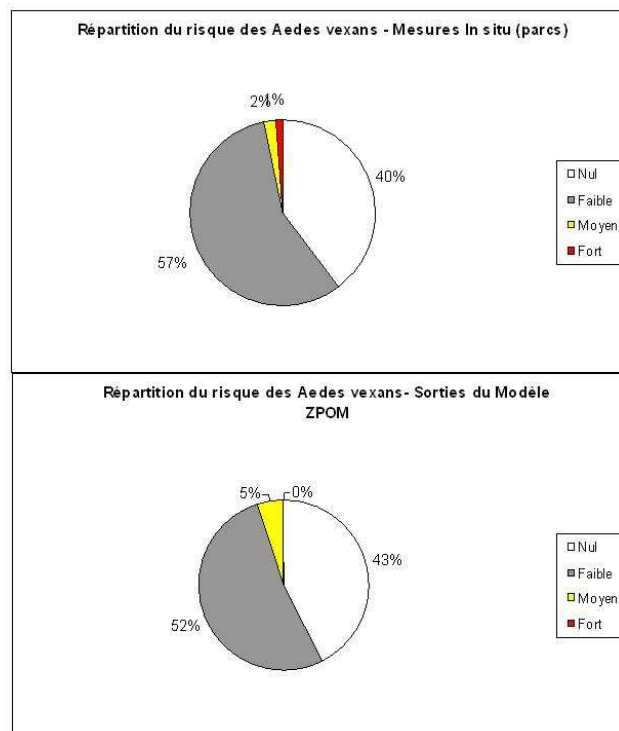


Figure 7 : comparaison du niveau de risque des *Aedes vexans* entre mesures in-situ et sorties du modèle ZPOM (mare de Niakha)

La comparaison entre le risque vectoriel mesuré et simulé dans les 181 parcs enquêtés entre le 15 juillet et le 30 octobre 2010 montre que :

- les densités d'*Aedes vexans* classés en 4 classes nulle, faible, moyenne et forte, sont à 97% dans le risque nul à faible, aussi bien pour les densités mesurées (40% nul + 57% faible) que simulées (43% nul + 52% faible) (cf. figure 7) ;
- les densités de *Culex poicillipes* sont encore plus faibles que celles d'*Aedes* avec un risque pratiquement nul (99%) aussi bien pour les mesures in-situ (97% nul + 2% faible) que pour les sorties de modèle (82% nul + 17% faible) (cf. figure 6).

Objectif 2 : étudier l'impact de la variabilité du climat (du saisonnier jusqu'aux basses fréquences, comprenant les tendances et le changement climatique) sur la prévision du risque vectoriel.

La dynamique des pluies au Sahel est fonction d'au moins 4 échelles de temps: l'échelle saisonnière, l'échelle interannuelle, l'échelle dites basses fréquences (quasi-décennale à multi décennale) et la composante anthropique du changement climatique.

Les points principaux qu'il faut retenir de cette étude sont les suivants :

- La *prévision saisonnière* probabiliste (sous forme de quantiles) à grande échelle présente des limites pour être utilisée aux échelles spatio-temporelles plus fines du projet AdaptFVR. Des progrès sur la désagrégation spatiale et sur les prévisions sub-saisonnières sont en cours de développement. Cependant ces informations statistiques qui sont disponibles aujourd'hui et qui sont mises à jour tous les mois (voir produits EUROSIP) doivent permettre aux systèmes sanitaires de proposer une stratégie d'adaptation anticipative (en amont) face au risque potentiel d'apparition des épidémies liées en partie, au climat du Ferlo.
- Les *prévisions interannuelles à basse fréquences*, basées sur des corrélations statistiques entre la SST (température de surface de l'océan) et la densité de vecteurs *Aedes*, est prometteuse puisque notre étude sur la période 1960-2010, montre des phasages positifs entre les deux séries chronologiques. Une adaptation à moyen terme devient donc possible : c.à.d des anomalies positives/négatives de SST sur des périodes de 10-15 ans sont associées à une augmentation/réduction de la production d'*Aedes* au début de la saison des pluies au Ferlo. Les modifications d'adaptations anticipatives à moyen terme, à partir d'indices climatiques en temps réel de types QDO (Quasi Decenal Oscillation) et AMO (Atlantic Multi-decenal Oscillation) semblent plus difficiles à mettre en œuvre puisque, 1) les deux signaux interagissent (se modulent) entre eux, et 2) le changement définitif du phasage de l'AMO demande au moins 6 mois de mesures pour être

vérifié. Par exemple pour la période 2011-2012 les phases négatives sont très faibles et un retour à des phases positives pourrait être envisagé avec des pluies au moins normales sur le Ferlo.

- L'adaptation *au changement climatique* du 21^{ème} siècle à partir des premiers résultats de CORDEX-Afrique (scénarios RCP 8.5 et 4.5 W/m²), semblerait minime tout au moins en ce qui concerne le climat au Sénégal. Très peu de changements sont à prévoir au niveau des quantités de précipitations sur le Ferlo. En effet aucune variation significative de la température sur le Ferlo n'est à signaler, alors que la tendance (détectée statistiquement) d'une variation de -10 mm de précipitation à Barkédji sur les 50 ans à venir est non seulement très faible, avec peu d'incidence sur la dynamique des mares, mais se trouve surtout dans la limite des incertitudes des modèles numériques.

La conclusion générale est que la prévision saisonnière doit être améliorée sur des échelles plus fines (projet TIGGE en cours du THORPEX Interactive Grand Global Ensemble, avec des prévisions de 1 jour à deux semaines. <http://tigge.ecmwf.int/>). Ceci devrait permettre d'améliorer les modèles de dynamique des mares. La variabilité basses fréquences du climat Atlantique est très prometteuse pour des adaptations de systèmes d'information sanitaires sur des périodes décennales. Enfin peu de changement est à prévoir pendant la première moitié du 21^{ème} siècle sur les précipitations cumulées dans la région de Barkedji. La dynamique des mares et la production des vecteurs de la FVR ne devraient donc pas changer notablement dans les prochaines décennies.

Dans ces conditions, le facteur d'influence majeur serait anthropique, à savoir la pression de l'utilisation des sols pour l'agriculture au détriment de l'élevage, plutôt que climatique.

Objectif 3 : étudier les processus d'adaptation dans la gestion du pastoralisme (santé animale principalement) face aux risques prédicts.

Le GIEC (2001) définit l'adaptation en ces termes « *Réaction des systèmes naturels ou anthropiques aux stimuli climatiques réels ou prévus ou à leurs effets, en vue d'en atténuer les inconvénients ou d'en exploiter les avantages* ».

Le GIEC (2001) identifie plusieurs sortes d'adaptations, notamment l'*adaptation anticipative*, l'*adaptation autonome*, l'*adaptation prévue*, l'*adaptation de caractère privé*, l'*adaptation de caractère public*, l'*adaptation réactionnelle*.

Le signal changement climatique en l'état actuel des connaissances n'est pas bien défini et quantifié au Sahel. Pour cette étude AdaptFVR, nous faisons le choix de présenter des actions verticales et transversales dans le cadre de l'adaptation anticipative (adaptation qui a lieu avant que les effets des changements climatiques ne soient observables. On parle aussi d'adaptation proactive).

Au Sénégal, la FVR figure sur la liste des maladies prioritaires surveillées par la Direction des Services Vétérinaires dans le cadre du Système national de surveillance épidémiologique des maladies (SNSE) et elle fait l'objet d'une double surveillance, à savoir active et passive. La problématique de l'adaptation est importante à plus d'un titre dans la mesure où avec la décentralisation, la santé tout comme l'environnement font partie des compétences transférées aux collectivités locales.

Le dispositif d'adaptation, proposé dans le cadre du projet AdaptFVR, va s'articuler autour de mesures anticipatives, liées certes à la prévention mais aussi aux cas de flambées épidémiques qui pourraient potentiellement survenir.

Les acteurs de l'adaptation anticipative sont entre autres : la DSV (niveau central), les Services régionaux et départementaux de la DSV, le Poste vétérinaire de Barkédji, la Communauté Rurale (CR) et l'Unité Pastorale (UP) de Barkédji. Pour mémoire, l'UP dispose d'un Comité de gestion qui a ses propres canaux de vulgarisation à travers différents sous-comités villageois mais aussi une radio rurale où des émissions destinées aux pasteurs existent déjà. Ces dernières seront mises à contribution pour une diffusion la plus large possible des mesures d'adaptation préconisées par les acteurs locaux en se basant sur les cartes de risque mises au point dans le cadre du projet AdaptFVR.

1) Production et dissémination du Bulletin AdaptFVR de prévision de l'émergence des *Aedes* et des *Culex*

Tout au long de la saison des pluies 2010, les bulletins de prévision du risque des *Aedes vexans* et des *Culex poicilipes* ont été produits toutes les deux semaines et diffusés à l'ensemble des partenaires. En tout, 8 bulletins ont été produits et diffusés.

De fait, les principales mesures d'adaptation s'appuieront sur les sorties spatio-temporelles de la modélisation ZPOM du risque vectoriel (*Aedes* et *Culex*). Ces sorties sont présentées dans les Bulletins AdaptFVR produits en temps réel lors de la période expérimentale 2010. Il est donc indispensable de transférer la production des Bulletins aux organismes de recherche et aux utilisateurs sénégalais.

2) Utilisation du Bulletin AdaptFVR à travers des actions ciblées

Les trois principales actions de lutte focalisée contre la maladie qui se dégagent du projet AdaptFVR sont les suivantes :

- **éloigner les troupeaux des zones à risque** : à partir des cartes de risque vectoriel produites tous les quinze (15) jours, il sera donné des avis-conseils aux éleveurs de s'installer en dehors des zones à risque. Grâce à des panneaux qui seront confectionnés en langue locale (peul) et installés autour des mares, la DSV va indiquer aux éleveurs où s'installer. Les informations contenues dans le Bulletin, vont permettre d'optimiser l'implantation des parcs à bestiaux en fonction de la prévision du niveau de risque *Culex* ou *Aedes* et d'éviter ou de diminuer ainsi le contact hôte-vecteurs réduisant de ce fait le risque de transmission,
- **organiser la lutte anti-larvaire** : elle se fera de manière ciblée sur la base des bulletins de prévision d'émergence de moustiques fournis pour la saison des pluies. En 2010 (figures 8 et 9), sur les 1354 mares détectées dans la zone de Barkédji (45X45km) représentant une surface maximum de 1702 ha, seules 457 mares, en raison de leur taux de couverture en végétation supérieur à 50%, sont potentiellement productrices de *Culex*. Ces mares à « *Culex* » représentent une surface maximum de 373ha. L'évolution dynamique de la surface et du nombre de mares à *Culex* à traiter est montrée sur la figure 8. En moyenne, la surface à traiter est de 68,2 ha correspondant à 115 mares à « *Culex* ». Ces informations donnent une idée de la surface globale à traiter, et donc de la quantité de produit anti-larvaire et du coût économique que représenterait un traitement préventif. L'Institut Pasteur de Dakar étudie actuellement la faisabilité et le coût de la lutte anti-larvaire dans la zone de Barkedji.

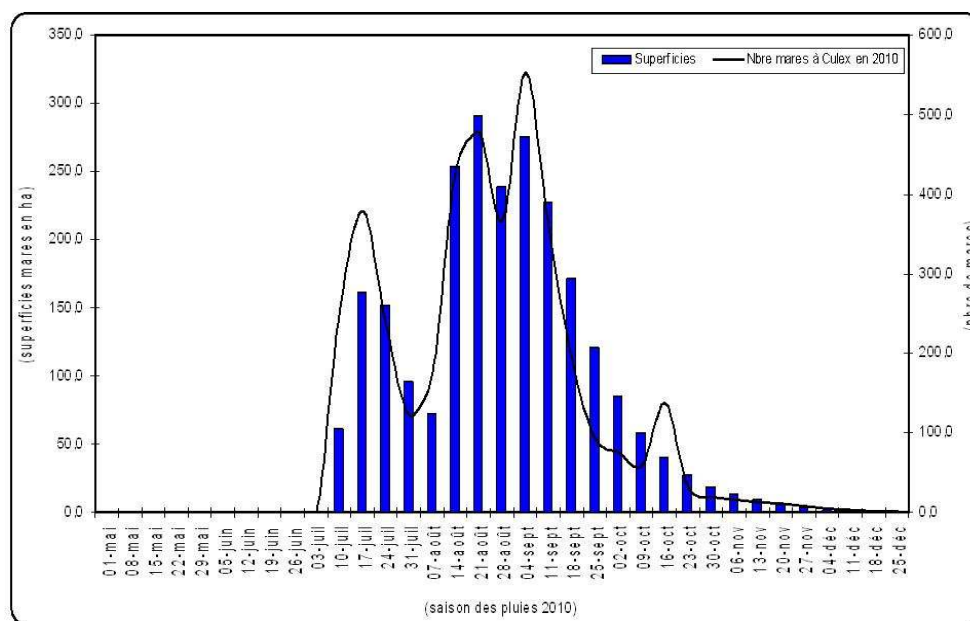


Figure 8 : Evolution des superficies et du nombre à mares *Culex* durant la saison des pluies 2010 sur la base des sorties du modèle ZPOM.

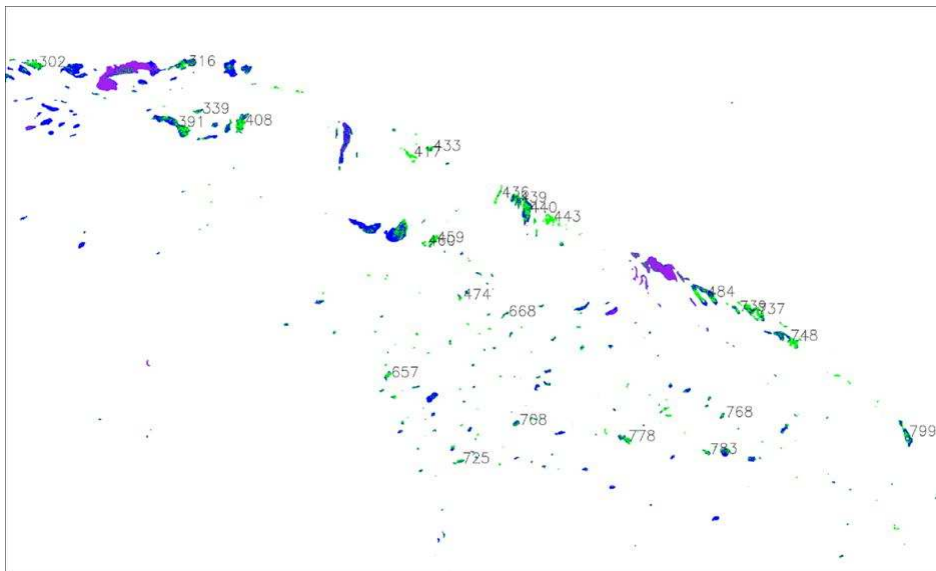


Figure 9: Carte prévisionnelle des mares à traiter (larvicide) autour de Barkédji à partir des sorties du modèle ZPOM de la zone de 45*45 km (en bleu, ce sont les mares en eau libre ; en vert, il s'agit de la végétation aquatique, et le violet correspond aux mares turbides ; les numéros indique les mares dont la superficie est supérieure à 1 ha)

- **organiser au besoin la vaccination** : les cartes de prévision du niveau de risque vectoriel peuvent également être utilisées pour optimiser la stratégie de vaccination de la DSV. En effet, en disposant des informations sur la base des périodes à haut risque identifiées, comme par exemple les pluies tardives de fin de saison humide, il est possible de cibler les zones pour les campagnes de vaccination.

3) Mise en œuvre de la stratégie d'adaptation par des actions de communication : nationale et locale

Pour que les mesures d'adaptation issues des bulletins ZPOM soient pleinement efficaces au niveau local, il s'agira aussi de prendre en compte une donnée importante et fondamentale pour la réussite des mesures d'adaptation : l'appropriation des produits élaborés par les communautés au niveau local.

Une communication efficace exige que les produits soient accessibles certes, mais surtout qu'ils soient compréhensibles, ce qui va exiger qu'ils soient traduits en langue locale, notamment en peul et/ou wolof... Cela peut être largement envisagé dans la mesure où des campagnes d'alphabétisation ont fait leur preuve et qu'elles constituent au Ferlo un élément facilitateur qui pourrait être mis à contribution en vue de la réussite de l'après-projet.

Il reviendra à la DSV de montrer la valeur ajoutée des bulletins de prévision élaborés dans le cadre du projet *AdaptFVR* pour faciliter leur appropriation. Il est prévu d'informer la population par des messages en langues locales sur les radios communautaires.

Une première forme concrète de communication a été réalisée grâce à des panneaux interdisant l'implantation des parcs à animaux à moins de 500m des mares ; ils ont déjà été mis en place.

La communication se fait également au niveau national, auprès du Ministère de l'Elevage dont dépend la DSV puisque pendant la durée du projet, la DSV, qui participe à un groupe de travail de l'Assemblée Nationale du Sénégal, a présenté le projet *AdaptFVR* ainsi que les bulletins de prévision.

DISCUSSION - CONCLUSIONS - PERSPECTIVES

S'appuyant sur des connaissances multi-disciplinaires acquises grâce à une coopération Nord-Sud fructueuse ces 10 dernières années, le projet *AdaptFVR* a tenu ses objectifs et a concrètement débouché sur des mesures d'adaptation.

Le modèle bio-mathématique ZPOM fournissant des cartes de prévision du risque vectoriel a été optimisé pour les *Aedes* et a été complété d'un module de prévision pour les *Culex*. La comparaison de sorties du modèle avec les mesures entomologiques de terrain montrent une bonne adéquation.

Les bulletins prévisionnels du risque vectoriel fournis sur un rythme de production quasi-opérationnel ont été validés et utilisés sur le terrain par les utilisateurs. Ces bulletins ZPOM, qui intègrent des données issues des observations satellites, entrent dans la stratégie d'adaptation élaborée par la Direction des Services Vétérinaires du Ministère de l'Elevage du Sénégal, en concertation avec les acteurs de terrain. Déjà, des premières mesures d'adaptation ont été mises en œuvre. D'autres mesures, comme l'organisation de la lutte anti-larvaire, font l'objet d'études pour mieux connaître les moyens et les coûts nécessaires à leur mise en œuvre.

Enfin, le transfert du CNES au CSE du modèle prévisionnel de carte de risque d'émergence des moustiques vecteurs de la FVR est en cours de formalisation.

Ce transfert, réalisé sur un organisme sénégalais dont les compétences sont reconnues internationalement, devrait avoir un impact régional sur la prévision des risques vectoriels de la Fièvre de la Vallée du Rift.

Actuellement, d'autres études utilisant la même approche de télé-épidémiologie sont en cours pour le paludisme en milieu urbain et rural dans le cadre du projet PaluClim soutenu par le GICC, et pour la dengue.

III. LISTE DES PRINCIPALES VALORISATIONS DES RECHERCHES

Bulletins de prévision :

Bulletin n°1 :	7 juillet 2010
Bulletin n°2 :	10 juillet 2010
Bulletin n°3 :	15 juillet 2010
Bulletin n°4 :	2 août 2010
Bulletin n°5 :	16 août 2010
Bulletin n°6&7 :	16 septembre 2010
Bulletin n°8 :	1 ^{er} octobre 2010

Publications :

- Cissé A., Bah A., Drogoul A., Cissé A.T., Ndione J.-A., Kébé C.M.F., 2012. Un modèle à base d'agents sur la transmission et la diffusion de la fièvre de la vallée du Rift à Barkédji (Ferlo, Sénégal). *Studia Informatica Universalis*, 77-97.
- GeoCarto, NASA Earth Observation Program for Public Health Special issue, December 2012, "CNES strategy, satellite data and modeling for public health: towards a cooperation with NASA », Murielle Lafaye and Cécile Vignolles, CNES; John Haynes and Sue Estes, NASA.
- Caminade C., Ndione J.-A., Jones A., Kébé C.M.F., Danuor S., Tay S., Tourre Y.-M., Lacaux, J.-P., Duchemin J.-B., Jeanne I., Morse A.P., 2011. Mapping Rift Valley fever and malaria risk over West Africa using climatic indicators. *Atmospheric Sciences Letter*, 12: 96-103.
- CNES Mag 2011, « Au Sénégal, le satellite protège les troupeaux », Murielle Lafaye et Cécile Vignolles, CNES
- Cécile Vignolles, Yves M. Tourre, Oscar Mora, Laurent Imanache, Murielle Lafaye, « TerraSAR-X high-resolution radar remote sensing: an operational warning system for Rift Valley Fever risk », *Geospatial Health* 5(1), 2010, pp.22-31

En cours de soumission :

- Dia I., Ndione J.-A., By Y., By D., Bocoum O., Diallo M., 2010. Mosquito species diversity and abundance in relation to land use/land cover in the Sahelian area of Senegal. *Soumis à Acta Tropica*.

Présentations à l'occasion de colloques:

- ISPRS 2012, 25/8-01/09, Yves M. Tourre, "Remote sensing in a changing Climate and Environment: the Rift Valley Fever Case", Melbourne, Australia,
- Ndione J.-A., 2011. Climate, Environment and Health: Recent Achievements in Senegal, pp. 96-97, in Omumbo J.A., Platzer B., Girma A., Connor S.J. (2011), *Climate and Health in Africa: '10 Years On' Workshop*, Addis Ababa (Ethiopia) IRI Technical Report 1101, International Research Institute for Climate and Society, Palisades, NY, 114 p.
- ISPRS 2011, 12-13 septembre 2011, Santa Fe (USA), « CNES satellite data and modeling for public health », Murielle Lafaye, CNES
- ISPRS 2011, 12-13 septembre 2011, Santa Fe (USA), "A conceptual approach of tele-epidemiology applied to Rift Valley Fever in Senegal", Cécile Vignolles, CNES
- NASA Public Health Program review, 13-16 septembre 2011, Santa Fe (USA), « CNES strategy, satellite data and modeling for public health », Murielle Lafaye, CNES
- Journée de la Société Française de Météorologie « Le changement climatique dans tous ses états » 23 mars 2011, « La Télé-épidémiologie, une aide à la santé dans un contexte de changement climatique », Murielle Lafaye, CNES

- Toulouse Space Show 2010, 8-11 juin 2010, session « Environnement-Climat-Santé », « Tele-epidemiology : which contribution for Earth Observation satellite data ? », Cécile Vignolles, CNES
- Tourre Y.-M., Lacaux J.-P., Vignolles C., Ndione J.-A., Lafaye M., 2010. Rift Valley Fever (RVF) risks in Senegal using high-resolution remote sensing. *International Archives of the Photogrammetry. Remote Sensing and Spatial Information Science*, Volume XXXVIII, Part 8, Kyoto Japan, 343-348.
- Bop M., Sambou S., Kébé C.M.F., Ndione J.-A., 2010. Modélisation du fonctionnement hydrologique d'un bassin endoréique pour une application à l'étude de la fièvre de la vallée du Rift (FVR). *Global change: facing risks and threats to water resources* (Proceedings of the Sixth World FRIEND Conference, Fez, Morocco, October 2010), IAHS Publ. 340, 305-313.

Présentations hors colloques :

- Au Ministère de la Santé, 15 novembre 2011, « CNES satellite data and modeling for public health », Murielle Lafaye, CNES
- A l'Institut Pasteur de Madagascar, octobre 2011, « CNES strategy, satellite data and modeling for public health », Murielle Lafaye, CNES
- au Centre de Compétences Techniques Applications, 12 mars 2011, « Télé-épidémiologie et Fièvre de la Vallée du Rift : études au Sénégal », Jacques-André Ndione, CSE
- au Ministère de la Santé, Direction Générale de la Santé, novembre 2010, Murielle Lafaye, CNES

Habilitation à Diriger la Recherche :

Soutenance de Jacques-André NDIONE le 22 juin 2012, Université de Bourgogne, Centre de Recherche de climatologie, « Approche intégrée du complexe environnement-climat-maladies vectorielles au Sénégal : synthèse de travaux sur la fièvre de la vallée du rift, la dengue et le paludisme »

Stages de Mastère :

- Clément GUILLOTEAU, projet de fin d'étude ENSEEIHT, « Apport des outils spatiaux au suivi de la Fièvre de la Vallée du Rift : estimation et prévision des densités de vecteurs », septembre 2012, 55 pages
- Matias ALCOBA, rapport de Mastère 2, « Apport des outils spatiaux au suivi de la Fièvre de la Vallée du Rift », juillet 2011, 35 pages
- Laurent IMANACHE, rapport de Mastère 2, « Fièvre de la Vallée du Rift : mise en place d'un système de prévention et d'alerte précoce », septembre 2010, 35 pages