

Téledétection, analyse et modélisation spatiales appliquées à l'épidémiologie des maladies animales

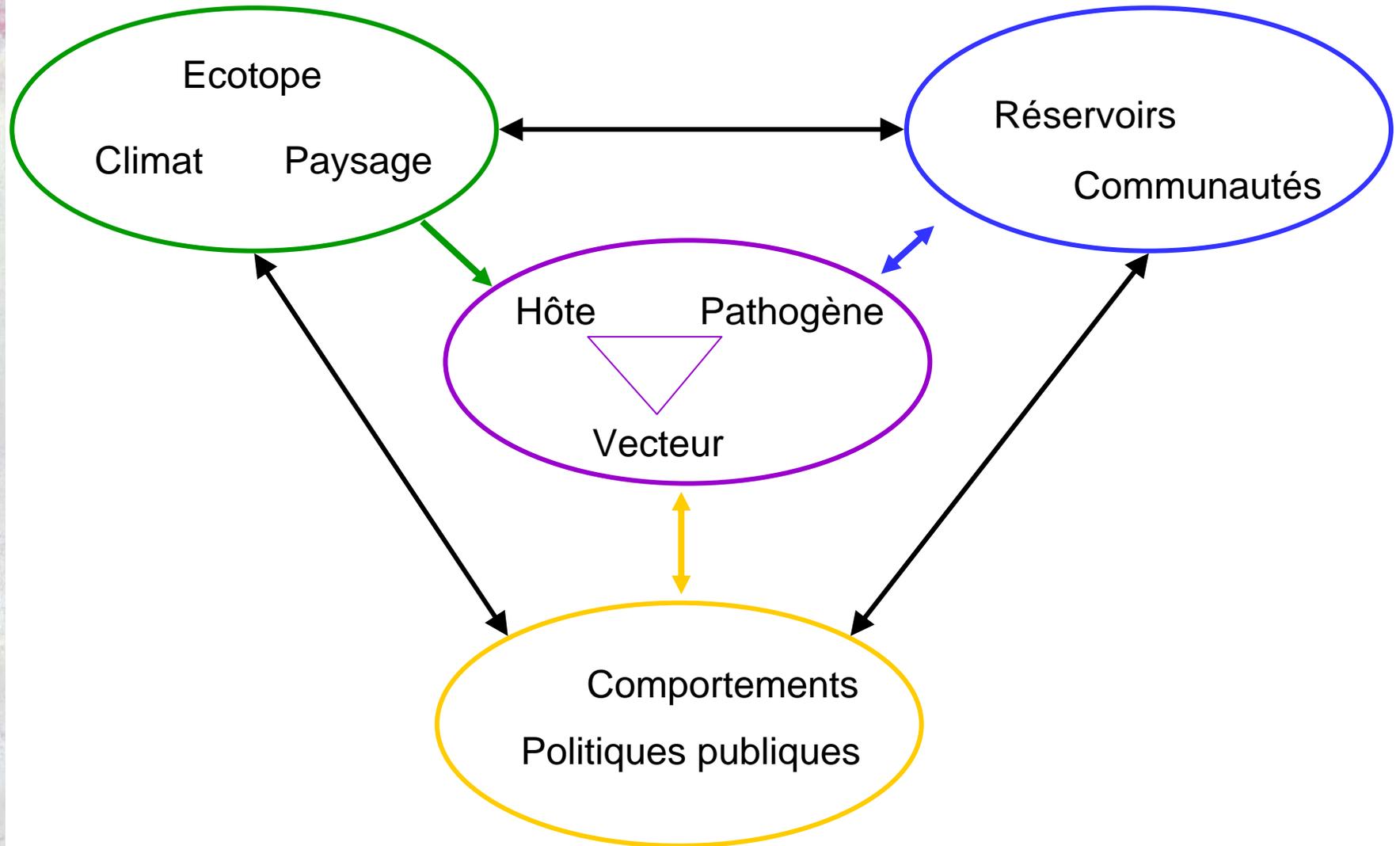
Annelise Tran

annelise.tran@cirad.fr

Plan de la présentation

- Contexte : Cadre conceptuel
- Résultats scientifiques
 - Apport de la télédétection
 - Analyse des patrons de transmission
 - Modélisation des processus
- Discussion

Cadre conceptuel : Schéma d'un système épidémiologique



Des idées anciennes...

400 av JC

Hippocrate

« Pour approfondir la médecine, il faut considérer d'abord les saisons, connaître la qualité des eaux, des vents, étudier les divers états du sol et le genre de vie des habitants »

XIXe

Jean-Christian-Marc Boudin

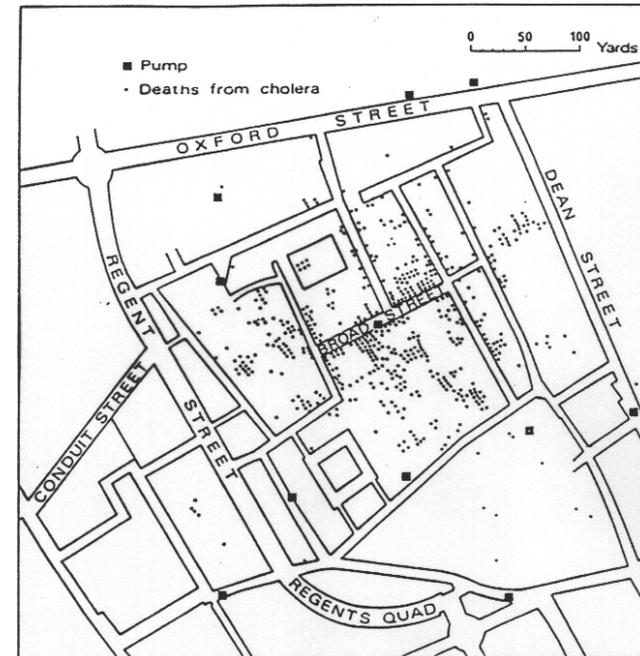
« Remonter des faits pathologiques aux lois qui président à la répartition géographique des maladies ainsi qu'à leurs rapports entre elles »

John Snow

XXe

Jacques May « *géographie médicale* »

Evgeniy Pavlovsky « *landscape epidemiology* »



... et des outils au développement récent

400 av JC

Hippocrate

XVIIIe

Daniel Bernouilli

XIXe Jean-Christian-Marc Boudin

John Snow

XXe

Ronald Ross 1908

Kermack et McKendrick 1927

Evgeniy Pavlovsky

Cline 1970

Jacques May

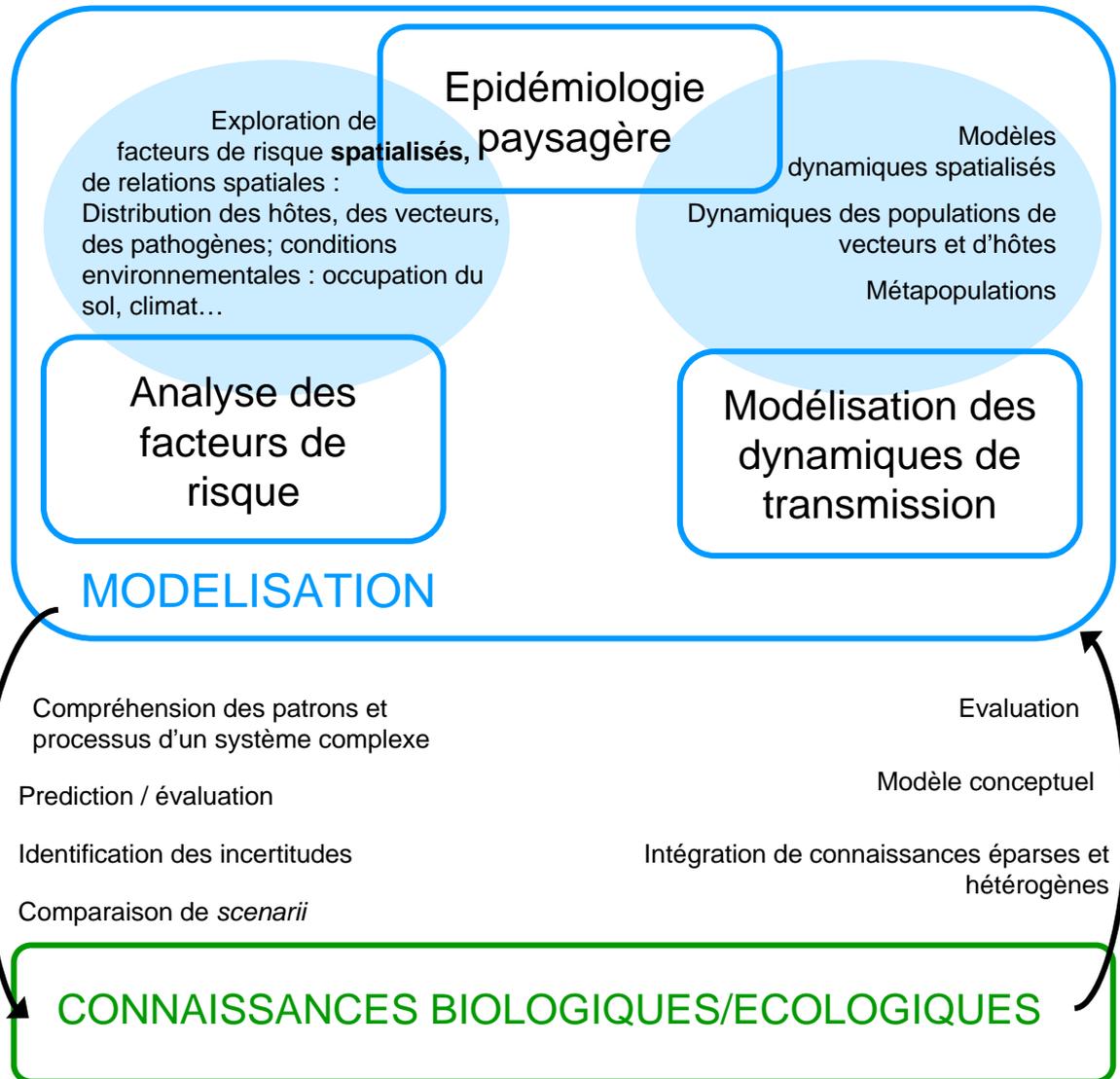
«New eyes for the epidemiologists: aerial photography and other remote sensing techniques (1970)»

Beck 2000

«Remote sensing and human health: new sensors and new opportunities (2000)»

Démarche

- Modélisation : des approches complémentaires
 - Analyse des facteurs de risque -> patrons
 - Modélisation mécaniste -> processus
- La place de l'épidémiologie paysagère
- L'apport mutuel de la biologie et de la modélisation



(Ezanno, 2012)

Les différents systèmes épidémiologiques étudiés

– Moustiques : Europe (France, Espagne, Italie), Sénégal, Maroc, Guyane

Zoonoses :

Fièvre de la Vallée du Rift

Fièvre du Nil Occidental

Maladies humaines :

Dengue, paludisme, ...

– *Culicoides* : France, Europe

Fièvre catarrhale ovine

– Phlébotomes : France, Algérie

Leishmaniose

– Avifaune : Afrique, Asie

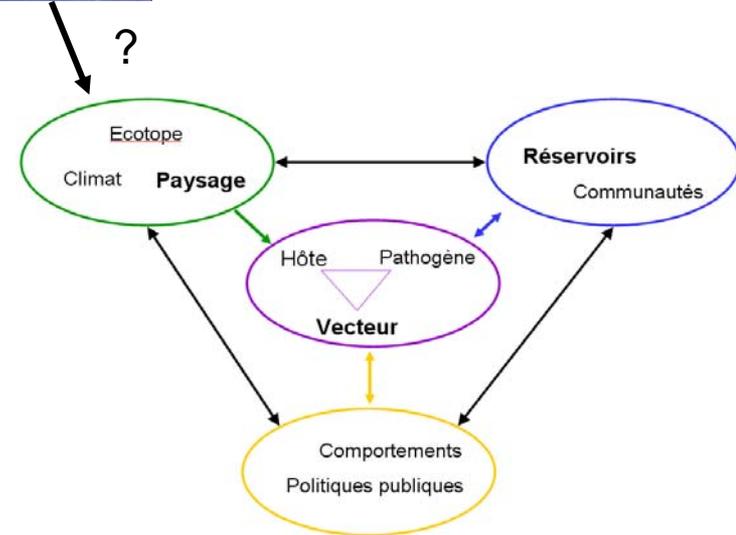
Grippe aviaire

- Rongeurs : Thaïlande, Cambodge, Laos

Leptospirose, ...

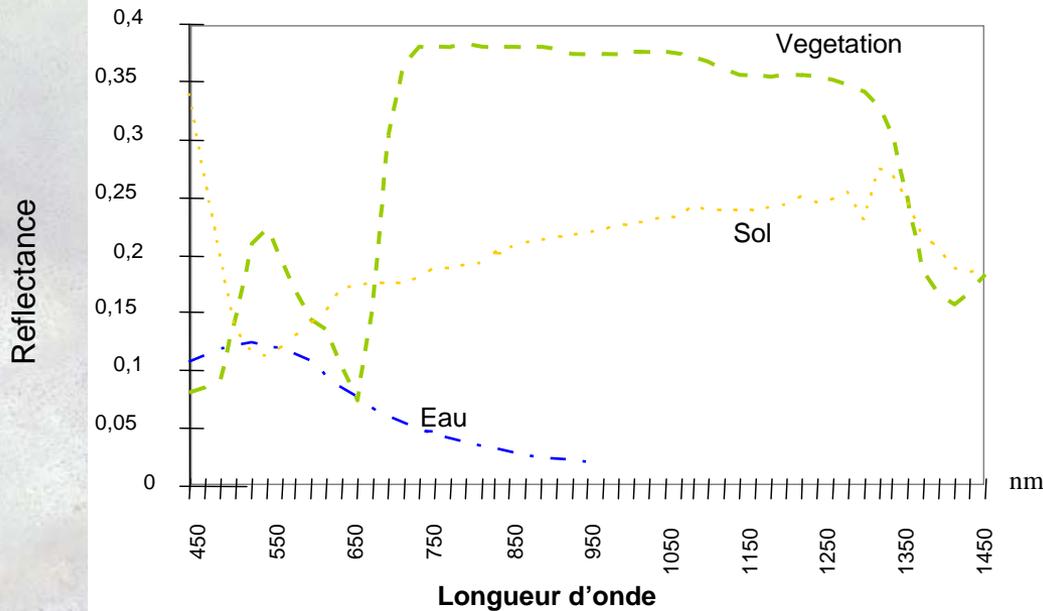
Plan de la présentation

- Contexte : Cadre conceptuel
- Résultats scientifiques
 - Apport de la télédétection
 - Analyse des patrons de transmission
 - Modélisation des processus
- Discussion

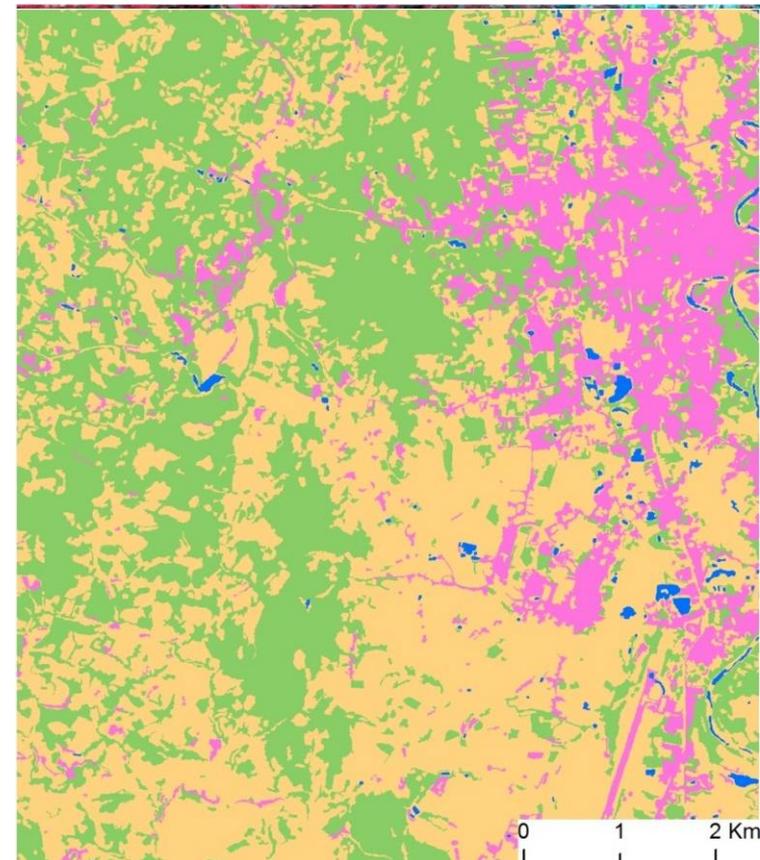


Téledétection

- De la mesure du rayonnement électromagnétique ...
... à la détection et caractérisation de l'habitat des vecteurs ou des réservoirs sauvages



Exemples de signatures spectrales

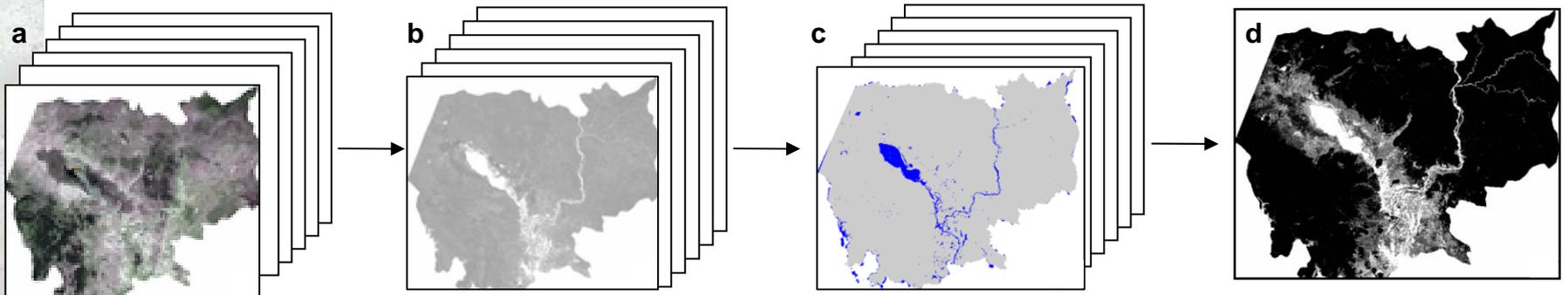


SPOT image, province de Loei, Thaïlande

Téledétection

- Détection et caractérisation de l'habitat des vecteurs ou des réservoirs sauvages : les informations utiles (1)

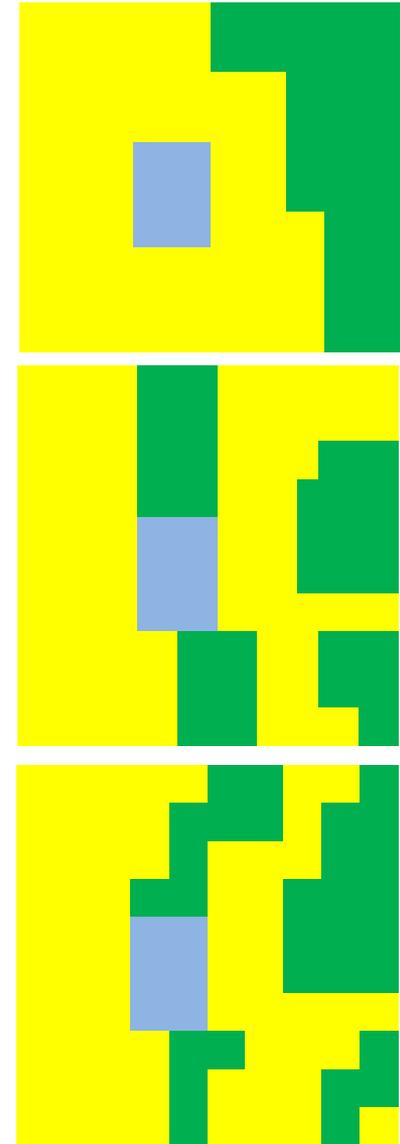
- L'occupation du sol
- Les surfaces en eau
- Evolution



600 km

Téledétection et indices paysagers

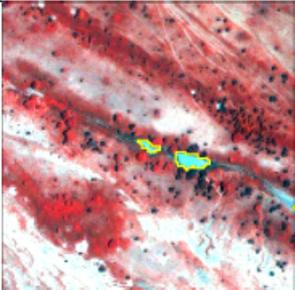
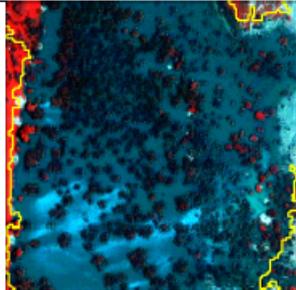
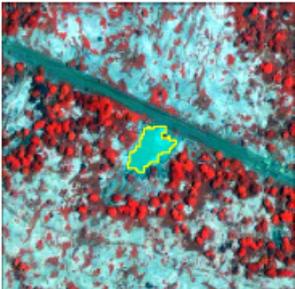
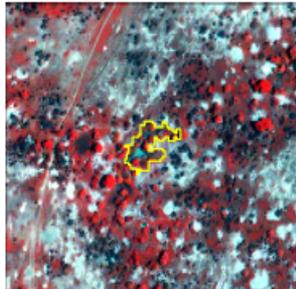
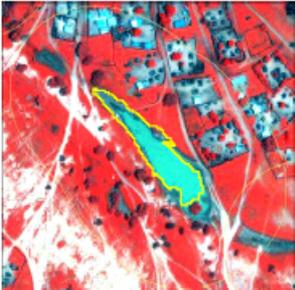
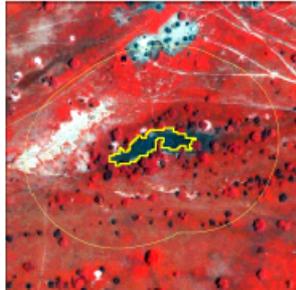
- Détection et caractérisation de l'habitat des vecteurs ou des réservoirs sauvages : les informations utiles (2)
 - Surfaces, distances
 - Indices de diversité, de fragmentation, de connectivité
 - Indices “à la carte” : définis en fonction d'hypothèses écologiques





- Exemple

- Détection des mares temporaires, Barkedji, Sénégal
- Caractérisation par des indices paysagers

Nom	Définition / Hypothèse	Image de la zone avec la plus faible valeur	Image de la zone avec la plus forte valeur
Surface en eau	Surface de la mare / Le risque de FVR est plus élevé à proximité de petites mares [Chevalier <i>et al.</i> , 2005]	 75 m ²	 363 525 m ²
Indice de couverture végétale aquatique	Surface de la mare couverte par la végétation divisée par la surface totale de la mare / Les mares riches en végétation constituent des habitats favorables aux moustiques [Clements, 1999, Clements, 2000]	 0	 0.96
Indice de densité de végétation calculé dans un buffer de 100 m	Surface de végétation dense dans une zone tampon autour de la mare de 100 m divisée par la surface de végétation ouverte / Le couvert végétal favorise la dispersion des moustiques [Clements, 1999]	 0,08	 1,3

Téledétection

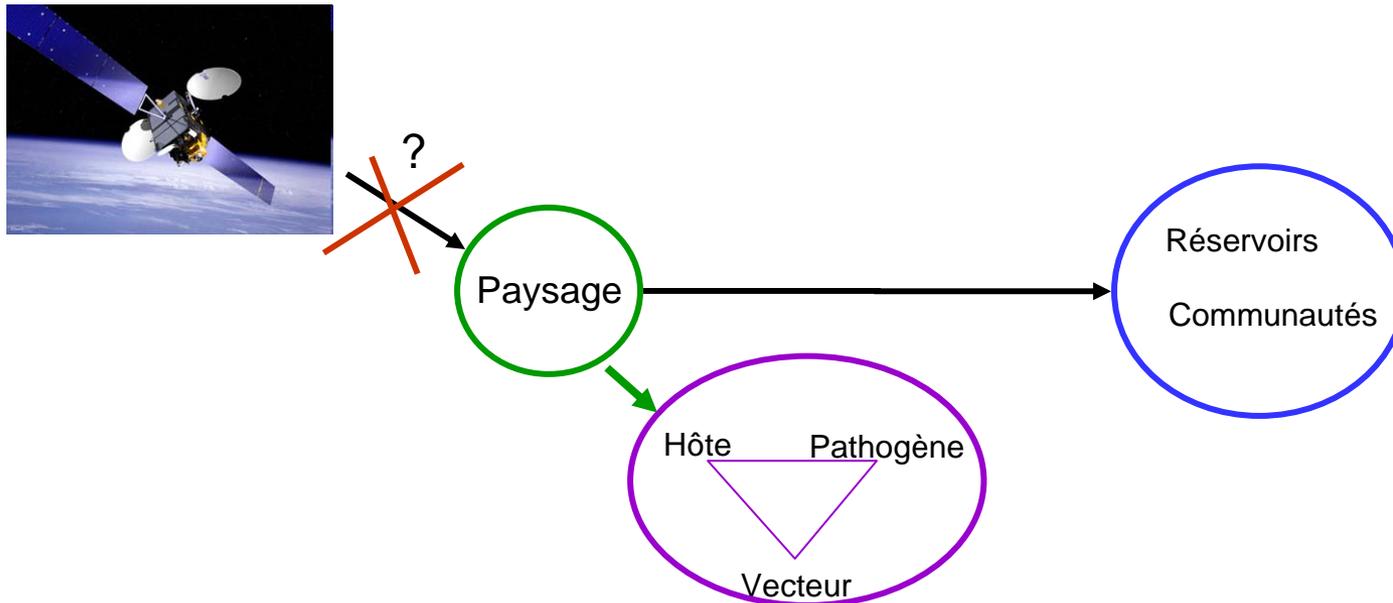
- Limites

- Caractéristiques très spécifiques (ex. propriétés de l'eau)

Tran A., et al. 2010. Remote sensing and avian influenza: a review of image processing methods for extracting key variables affecting avian influenza virus survival in water from Earth Observation satellites. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, **12** (1) : 1-8.

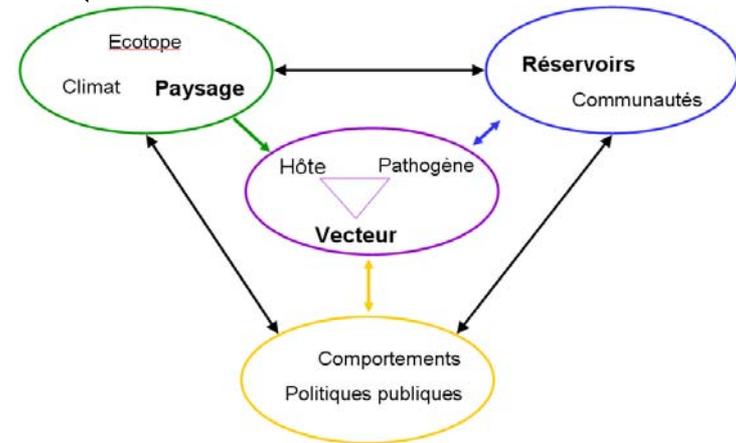
- Compromis résolutions spatiale/temporelle/spectrale

Soti V., et al. 2009. Assessing optical earth observation systems for mapping and monitoring temporary ponds in arid areas. *International journal of applied earth observation and geoinformation*, **11** (5) : 340-351.



Résultats scientifiques

- Apport de la télédétection
- Analyse des patrons de transmission d'un pathogène en lien avec l'environnement
- Modélisation des processus de transmission



Analyse

- Etude des corrélations

Variable expliquée

Données épidémiologiques :

présence de cas
taux d'incidence

Données entomologiques :

présence/absence
abondance

...



Variables explicatives

Caractéristiques environnementales :

✓ Occupation du sol (végétation, présence d'eau)

✓ Indices paysagers

✓ Climat (température, humidité)

✓ Relief ...

- Des questions méthodologiques

- Choix de l'unité spatiale d'analyse et localisation
- Choix des variables explicatives

Analyse des patrons

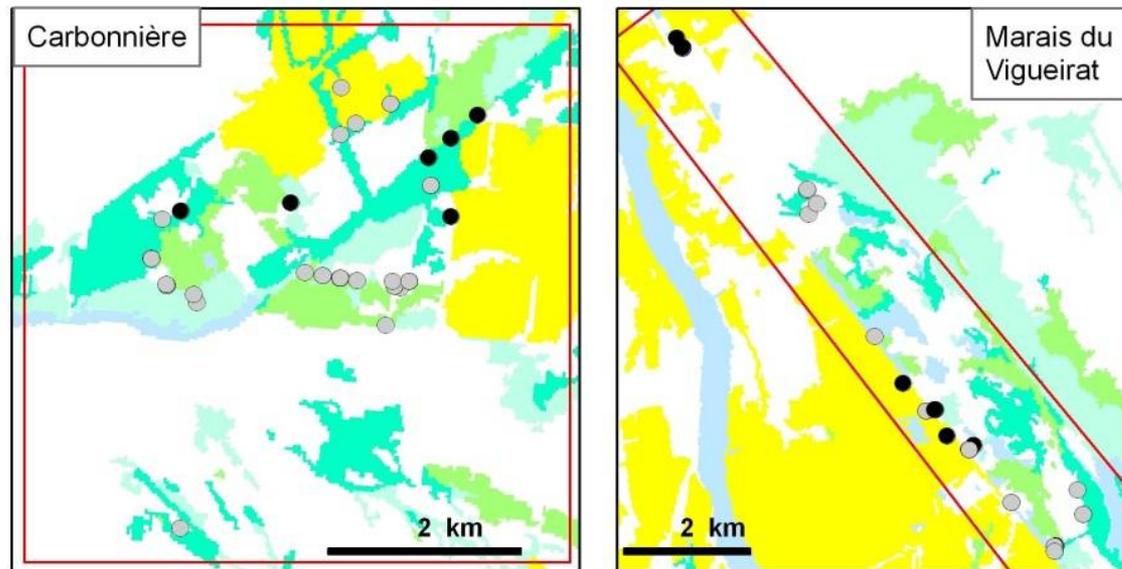
- Exemple : cartographie de la distribution de différentes espèces de moustiques (Camargue, France)
 - Quels sont les gites larvaires principaux de chaque espèce ?
 - Impact sur la distribution spatiale des populations adultes ?

Variable expliquée
Présence / absence de larves



Variables explicatives
Caractéristiques environnementales :

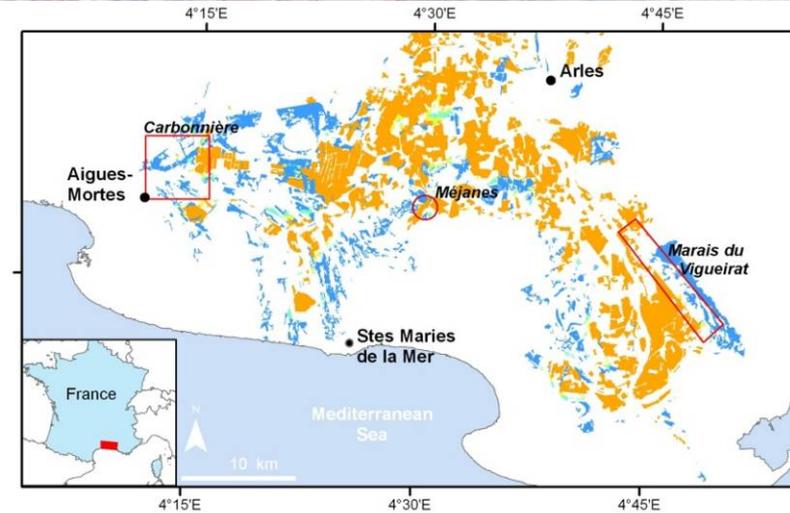
- ✓ Occupation du sol (images Landsat)



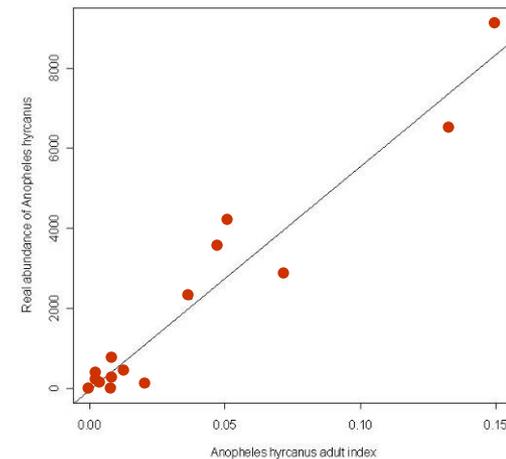
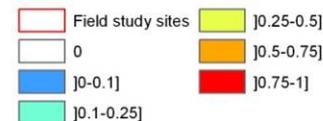
N
Mosquitoes larvae collections April - October 2006
Anopheles hyrcanus:
● Present ● Absent

Analyse des patrons

- Exemple : cartographie de la distribution de différentes espèces de moustiques
 - Résultats *An. hyrcanus* : les rizières et les marais à scirpes
 - Cartographie des gîtes
 - Vérification par confrontation avec des données de piégeages de moustiques adultes



Larval index for *An. hyrcanus*

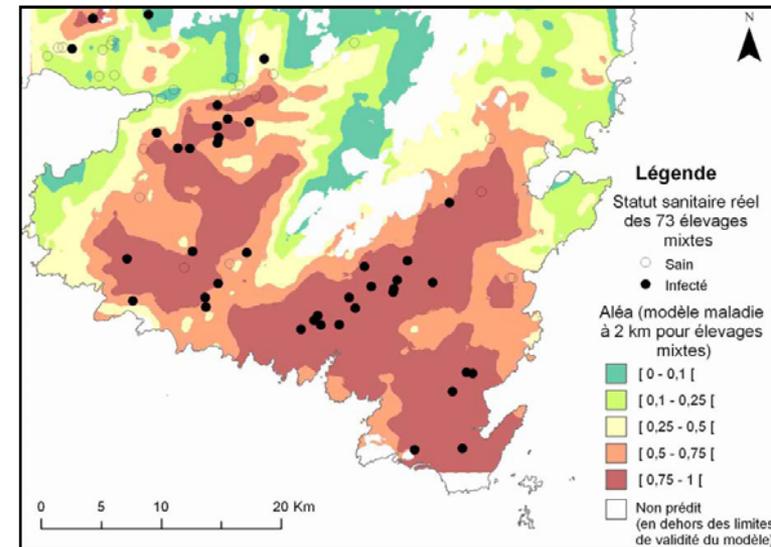
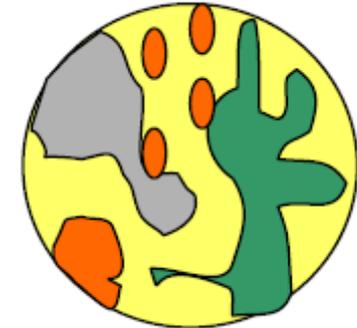


Tran A., et al. 2008. Using remote sensing to map larval and adult populations of *Anopheles hyrcanus* (Diptera: Culicidae) a potential malaria vector in Southern France. *International journal of health geographics*, 7 (9) : 1-12.

Cailly P., et al. 2011. Role of the repartition of wetland breeding sites on the spatial distribution of *Anopheles* and *Culex*, human disease vectors in Southern France. *Parasites and vectors*, 4 (65) : 8 p.

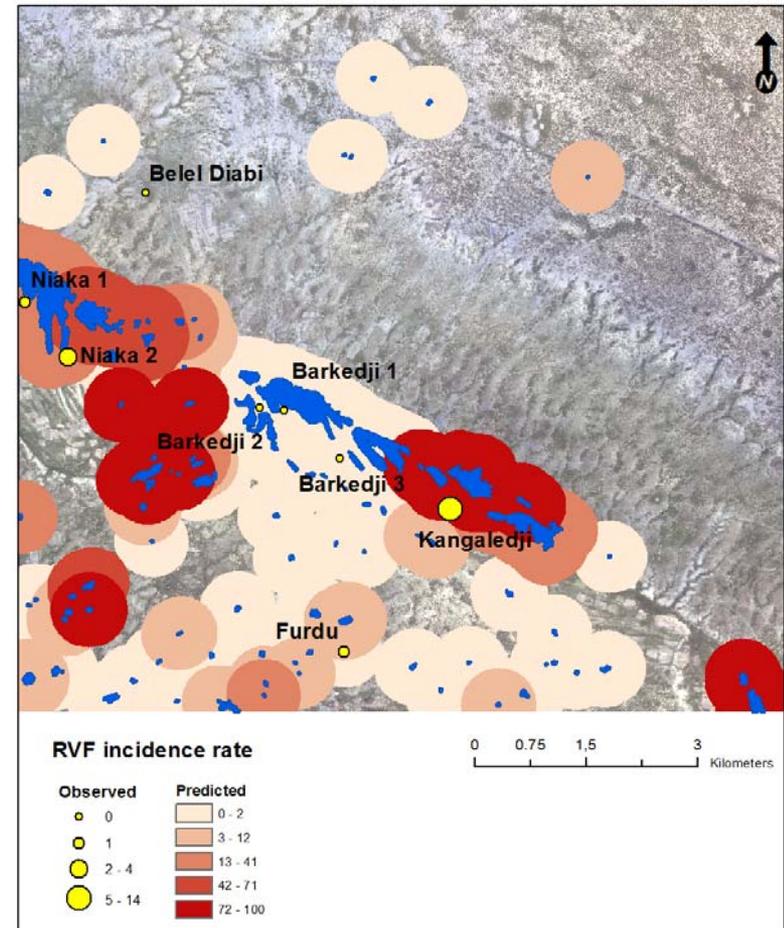
Analyse des patrons

- Importance des indices paysagers
 - Distribution spatiale de la fièvre catarrhale ovine en Corse
 - > pas d'association avec un seul type de végétation particulier
 - > Patch richness density, Landscape shape indices
 - > Fragmentation, imbrication des milieux
 - > réunion de milieux indispensables au vecteur : hôtes, gîtes de repos et de reproduction



Analyse des patrons

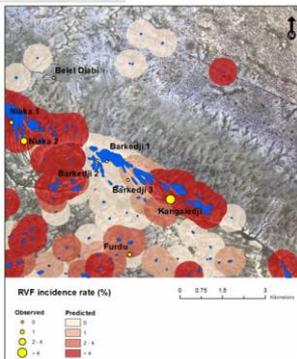
- Importance des indices paysagers
 - Paysages à risque de transmission de la fièvre de la Vallée du Rift
 - > Indice de densité de végétation autour des mares



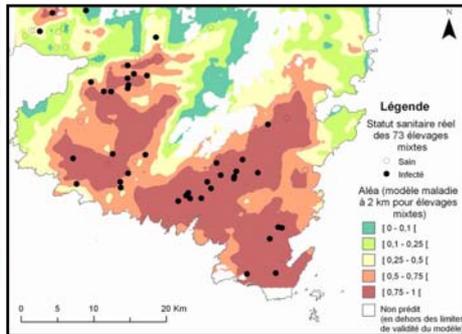
Analyse des patrons

- Du local au global

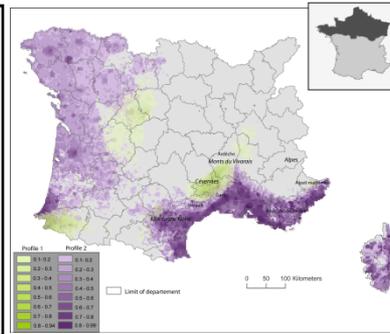
Facteurs climatiques :
température,
précipitation, humidité



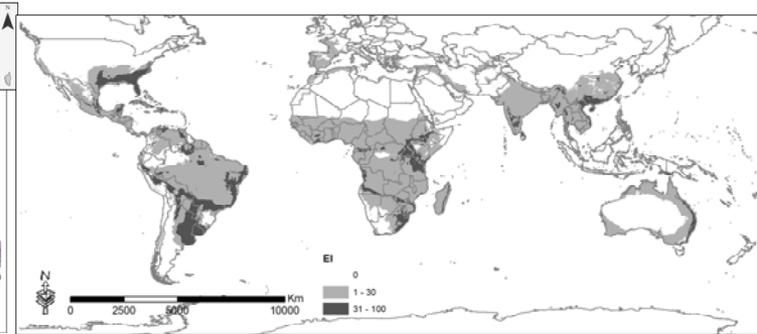
7 km



30 km



550 km



10000 km

Paysage : occupation du
sol, indices paysagers



- Chamailé L., et al. 2010. Environmental risk mapping of canine leishmaniasis in France. *Parasites and vectors*, **3** (31) : 8 p
- Guis H., et al. 2007. Use of high spatial resolution satellite imagery to characterize landscape at risk for bluetongue. *Veterinary research*, **38** : 669-683.
- Soti V., et al. 2013. Identifying landscape features associated with Rift Valley fever virus transmission, Ferlo region, Senegal, using very high spatial resolution satellite imager. *International Journal of Health Geographics*, **12** (10) : 11 p.
- Guichard S., et al. The current and future potential distribution of *Culicoides imicola*, bluetongue virus and African horse sickness (soumis)

Analyse

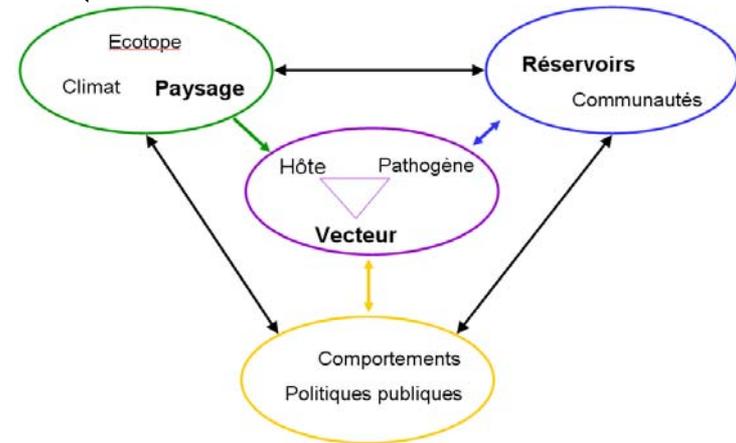
- Pour aller plus loin...
 - Démarche explicative (corrélation \neq causalité)



- Abondance des vecteurs \neq risque de transmission

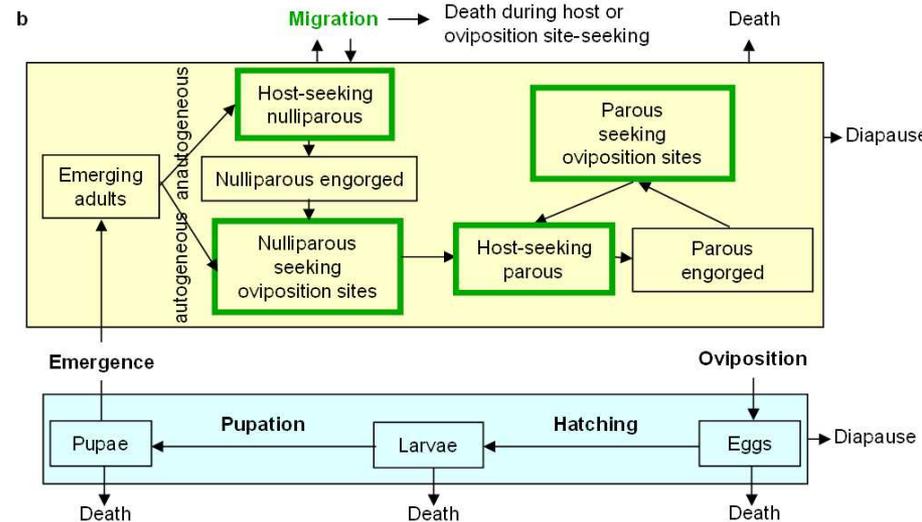
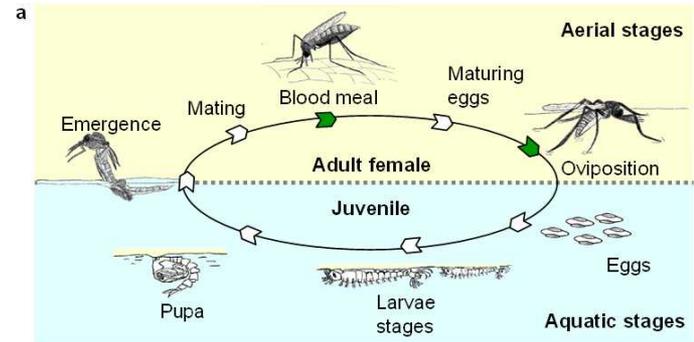
Résultats scientifiques

- Apport de la télédétection
- Analyse des patrons de transmission d'un pathogène en lien avec l'environnement
- **Modélisation des processus**
 - Dynamique de populations de moustiques
 - Risque de transmission



Modélisation des processus

- Des “patterns” aux “processus”
 - De la cartographie des gîtes larvaires à la simulation de la dynamique de population de moustiques
 - Modélisation de la dynamique de population (systèmes d'équations différentielles)
 - Couplage des composantes temporelles et spatiales



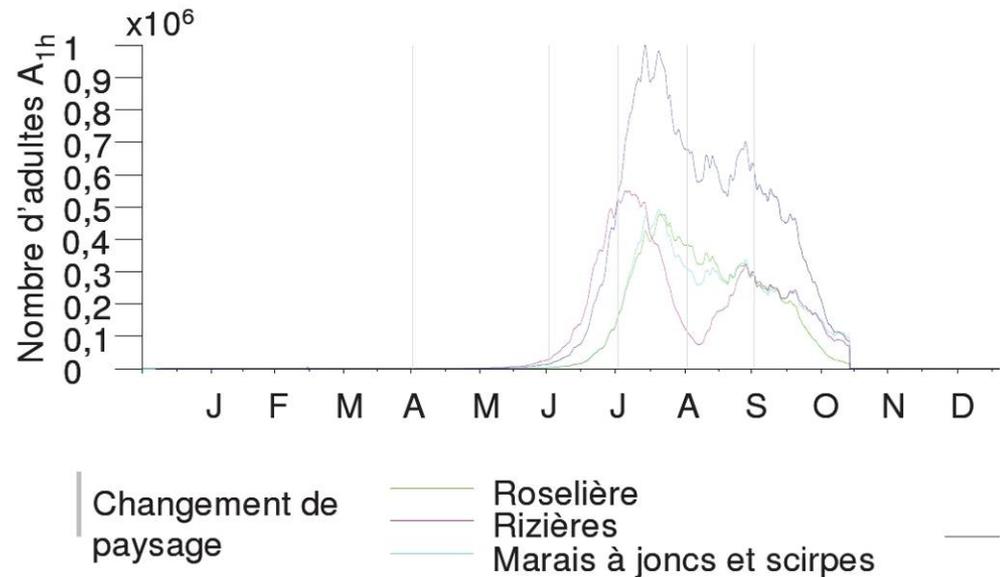
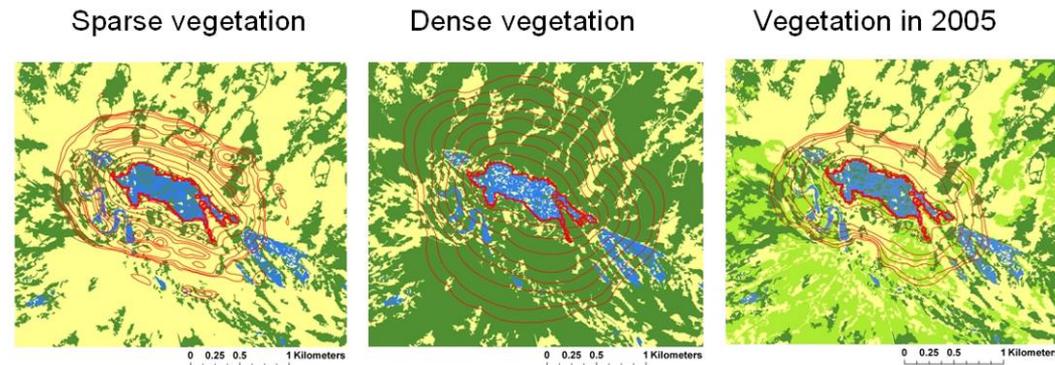
Cailly P., et al. 2012. A climate-driven abundance model to assess mosquito control strategies. *Ecological modelling*, **227** (1) : 7-17.

Soti V., et al. 2012. Combining hydrology and mosquito population models to identify the drivers of Rift Valley fever emergence in semi-arid regions of West Africa : consequences for control. *PLoS Neglected tropical diseases*, **6** (8) : e1795 (11 p.)

Tran A., et al. 2013. A Rainfall- and Temperature-Driven Abundance Model for *Aedes albopictus* Populations. *International journal of environmental research and public health*, **10** (5) : 1698-1719.

Modélisation des processus

- Applications
 - Simuler et prédire
 - Comparer des stratégies de contrôle
 - Etudier l'impact du paysage sur la dynamique de population



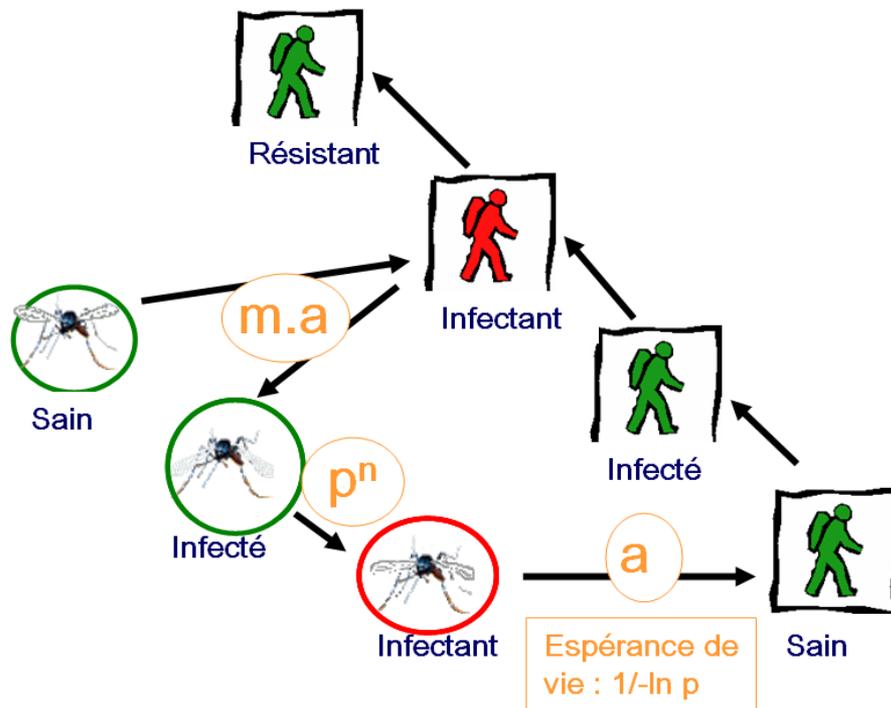
Cailly P., et al. 2012. A climate-driven abundance model to assess mosquito control strategies. *Ecological modelling*, **227** (1) : 7-17.

Soti V., et al. 2012. Combining hydrology and mosquito population models to identify the drivers of Rift Valley fever emergence in semi-arid regions of West Africa : consequences for control. *PLoS Neglected tropical diseases*, **6** (8) : e1795 (11 p.)

Tran A., et al. 2013. A Rainfall- and Temperature-Driven Abundance Model for *Aedes albopictus* Populations. *International journal of environmental research and public health*, **10** (5) : 1698-1719.

Modélisation des processus

- Des “patterns” aux “processus”
 - De l’abondance des vecteurs au risque de transmission



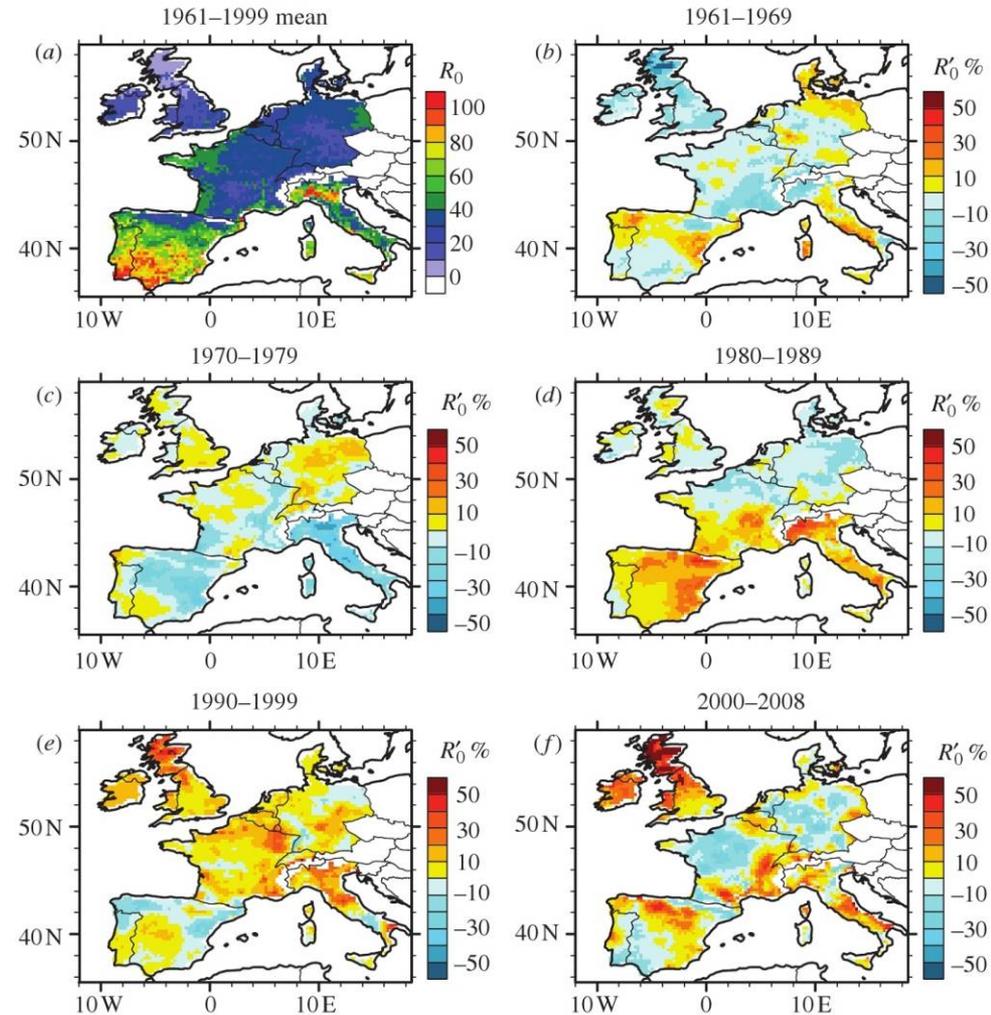
$$R_0 = \frac{ma^2 p^n}{-\ln p} \cdot \frac{b}{r}$$

Modélisation des processus

- Applications

- Identification des zones à risque pour la surveillance (risk-based surveillance)

- Etudier l'impact du changement climatique



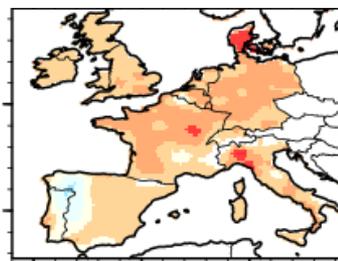
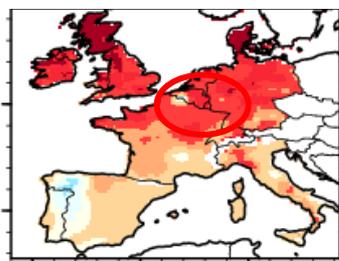
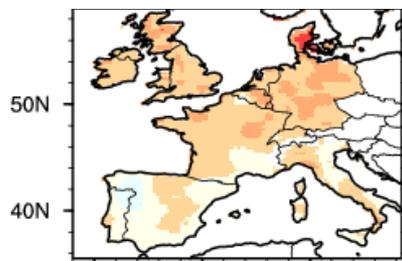
Anomalies R_0 (par rapport au climat de 1961 à 2006)



ν : 1/durée
d'incubation
extrinsèque

a: Taux de pique

V: Compétence

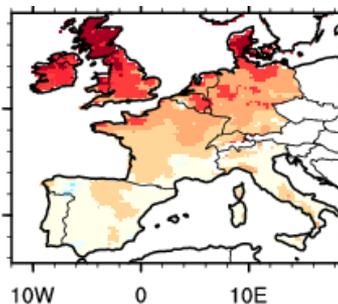
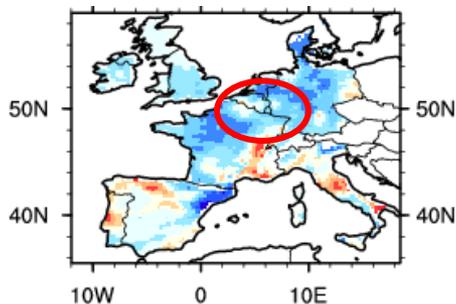


10W

10E

m: Abondance vecteurs

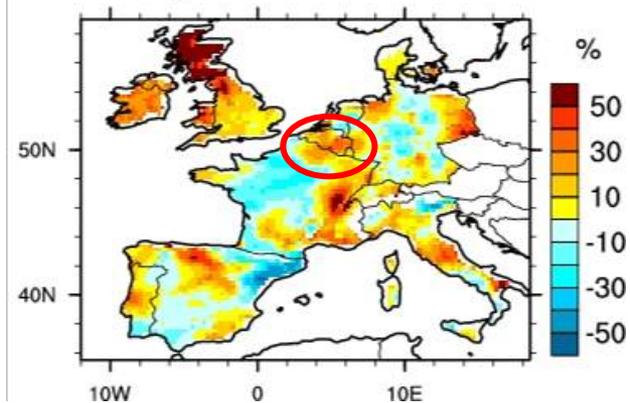
R_0 (a, V, ν)



-50 -40 -30 -20 -10 0 10 20 30 40 50

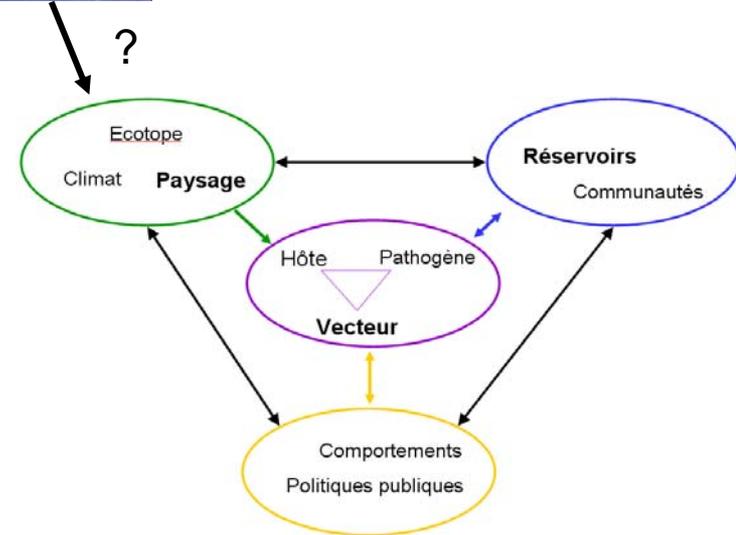
Changes (%)

2f) R_0' 2000-2006



Plan de la présentation

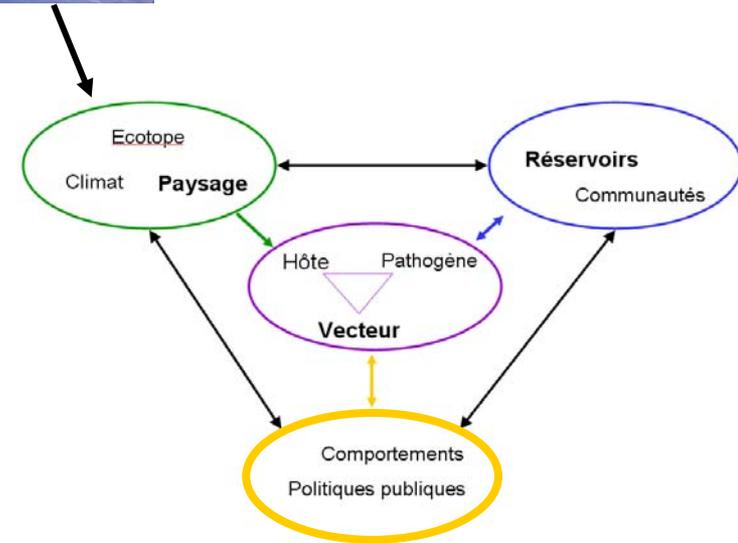
- Contexte : Cadre conceptuel
- Résultats scientifiques
 - Apport de la télédétection
 - Analyse des patrons de transmission
 - Modélisation des processus
- Discussion



Discussion (1)

- Apport de la télédétection

- Limites
- Maladies vectorielles : principales applications
- TD : outil intégré par les acteurs de santé publique / lutte anti-vectorielle
- Outil qui favorise l'inter-disciplinarité



- Pistes de recherche

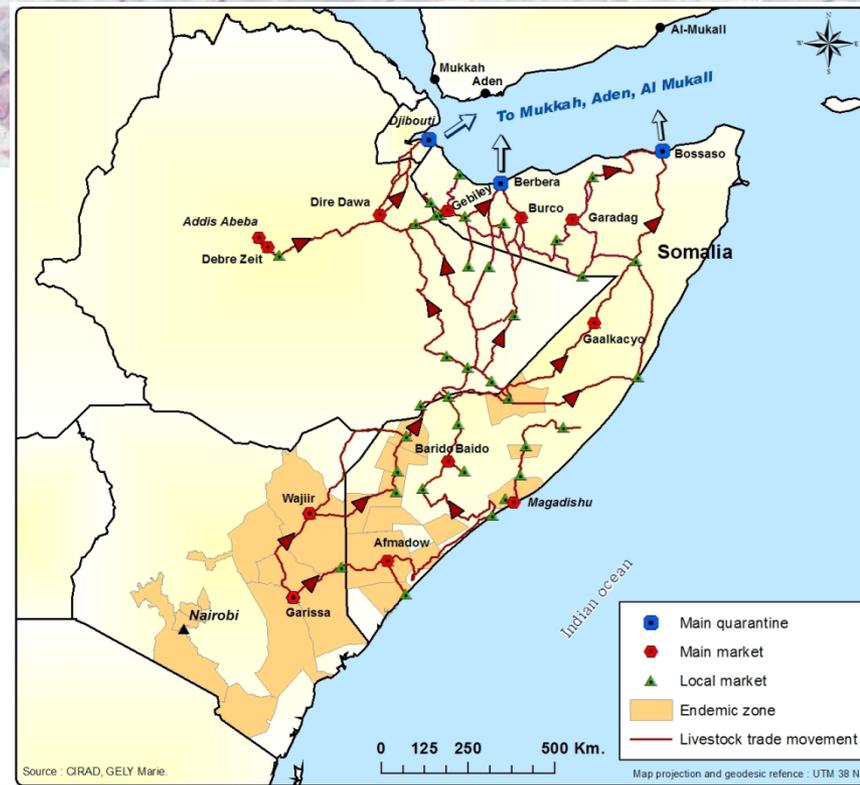
- Utilisation de la TD pour la caractérisation de l'habitat humain/des populations/des conditions socio-économiques...
- Caractérisation des élevages ?

(1) centre ancien		(4) habitat individuel diffus	
(2) habitat collectif		(5) habitat dispersé	
(3) habitat individuel dense		(6) habitat spontané dense*	

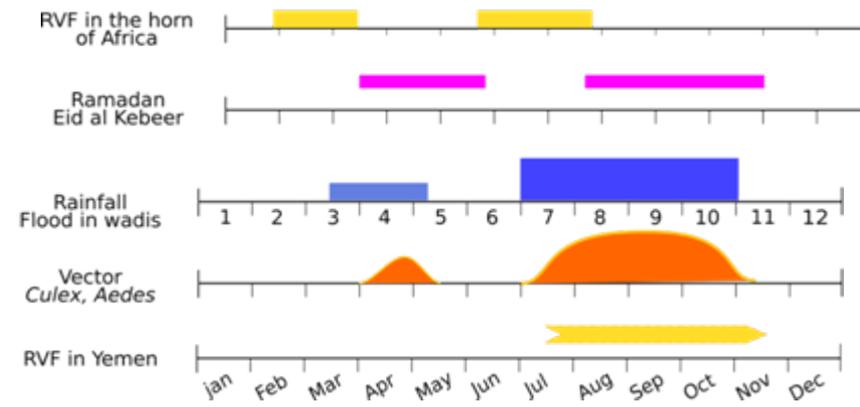
Discussion (2)

- Modélisation

- Résultats -> meilleure compréhension des déterminants de la transmission : émergence, maintien, diffusion des pathogènes
- Importance des facteurs environnementaux



- Autres facteurs ?
- > Commerce, pratiques d'élevage,...



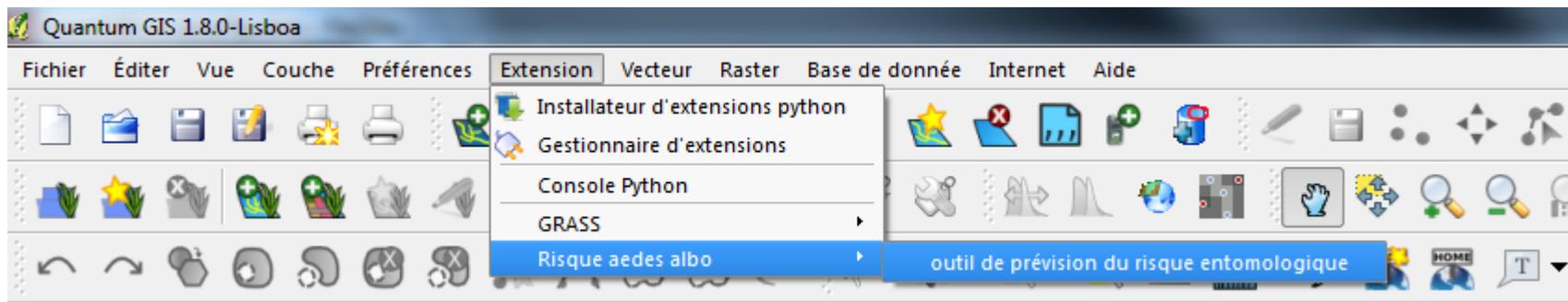
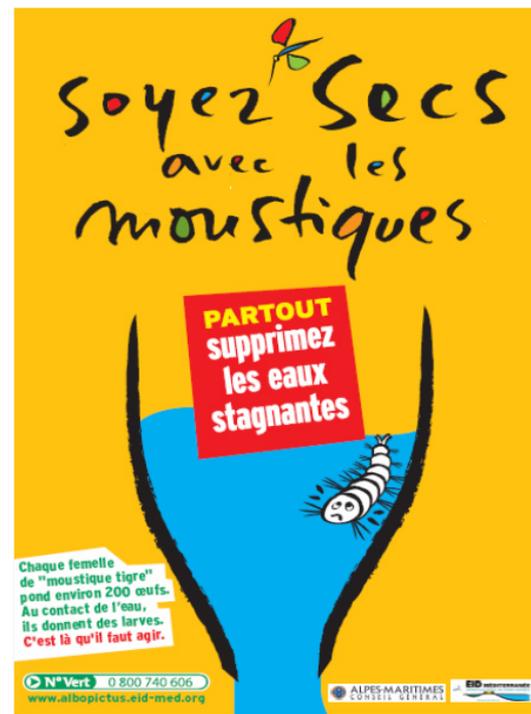
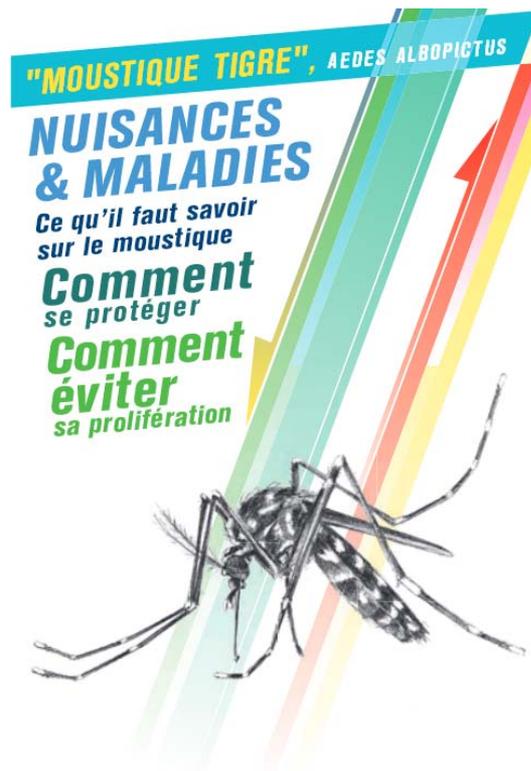
Abdo-Salem S., et al. 2011. Can environmental and socioeconomic factors explain the recent emergence of Rift Valley fever in Yemen, 2000-2001? *Vector-borne and zoonotic diseases*, 11 (1) : 1-7.

Lambin E.F., Tran A., Vanwambeke S.O., Linard C., Soti V.. 2010. Pathogenic landscapes: Interactions between land, people, disease vectors, and their animal hosts. *International Journal of Health Geographics*, 9 (54) : 13 p.

Discussion (3)

- Des allers-retours nécessaires entre modélisation et biologie
 - Construction / Validation des modèles
- De la compréhension de la transmission des maladies vectorielles à la surveillance et au contrôle
 - Comparer des stratégies de contrôle
 - Interprétation / utilisation des cartes par les acteurs de santé

Exemple d'outil : un SIG appliqué à la surveillance d'*Aedes albopictus*



L'outil génère trois types de cartes pour répondre à trois questions :

- Où est *Ae. albopictus* ?

-> Carte d'Aléa (Potentiellement 5 classes d'aléa)

- Où sont les hôtes ?

-> Carte de vulnérabilité (Potentiellement 5 classes de vulnérabilité)

- Où sont les zones de contact ?

-> Carte du risque (Potentiellement 5 classes de risque)

Fonctionnement

Données de départ

Images satellite, photographies aériennes

Statistiques INSEE infra-communales

Statistiques touristiques

Identification des sites visités, de sorties, ... au pic d'agressivité du soir

Météorologiques

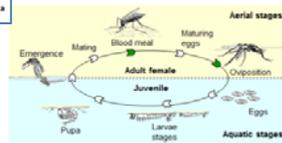
Piégeages moustiques

Arrosage artificiel simulé

Traitements d'images, photo-interprétation, traitements géomatiques



Modélisation de la dynamique de population de moustiques



Données en entrée

Végétation

Occupation du sol

Population mensuelle (matin, soir)

Fichier journalier du nombre de pares en recherche d'hôte, normalisé par le nombre max d'individus sur la période d'étude (plusieurs années)

Outil de prévision du risque entomologique



Coefficient/paramètre s

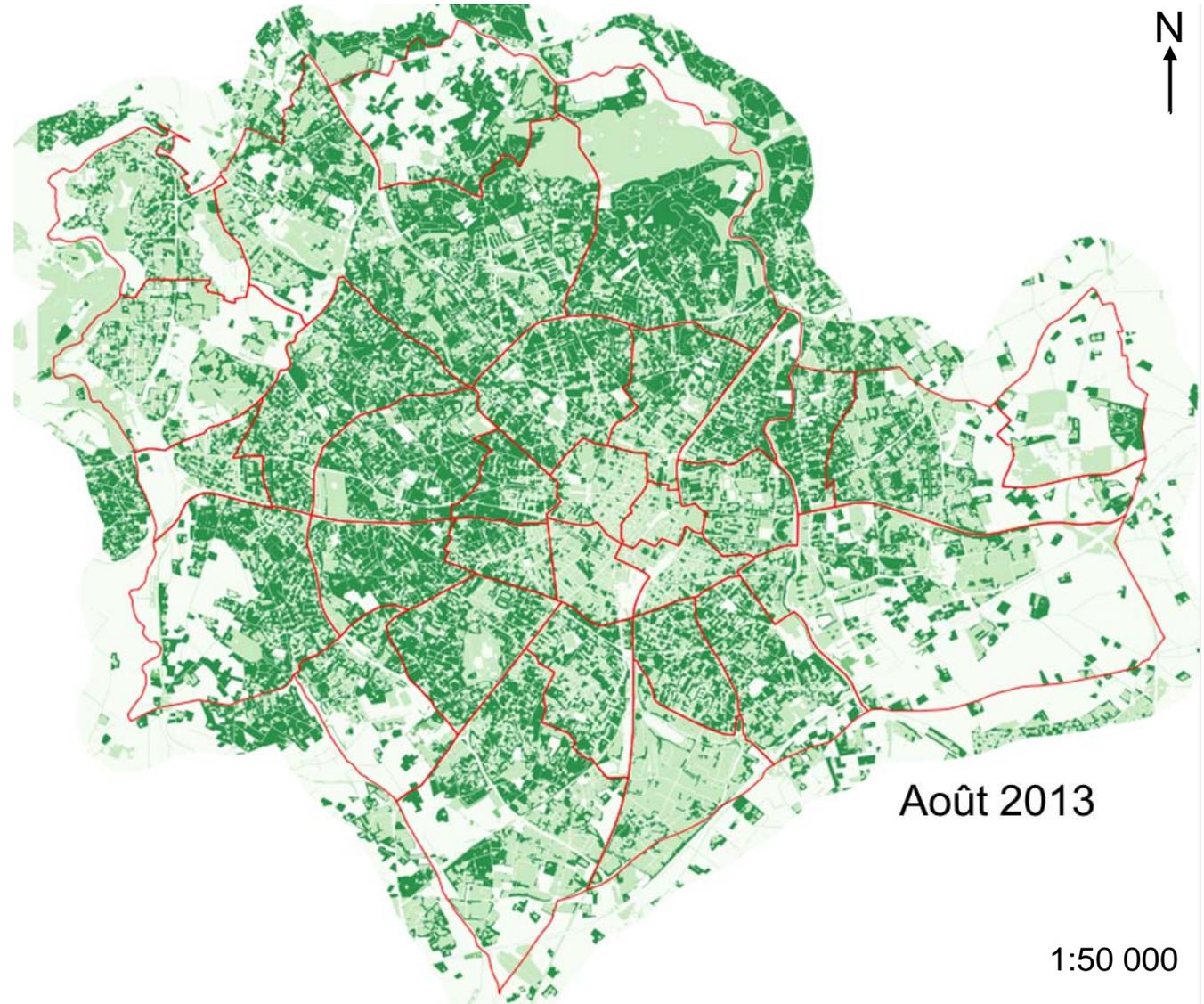
Données en sortie

Aléa

Vulnérabilité (matin, soir)

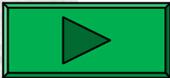
Risque (matin, soir, maximal)

Exemple sur Montpellier : Carte d'aléa



- Aléa nul à très faible
- Aléa faible
- Aléa moyen
- Aléa fort
- Aléa très fort

NB : Pour Montpellier en 2013 pas d'**Aléa très fort** identifié par l'outil



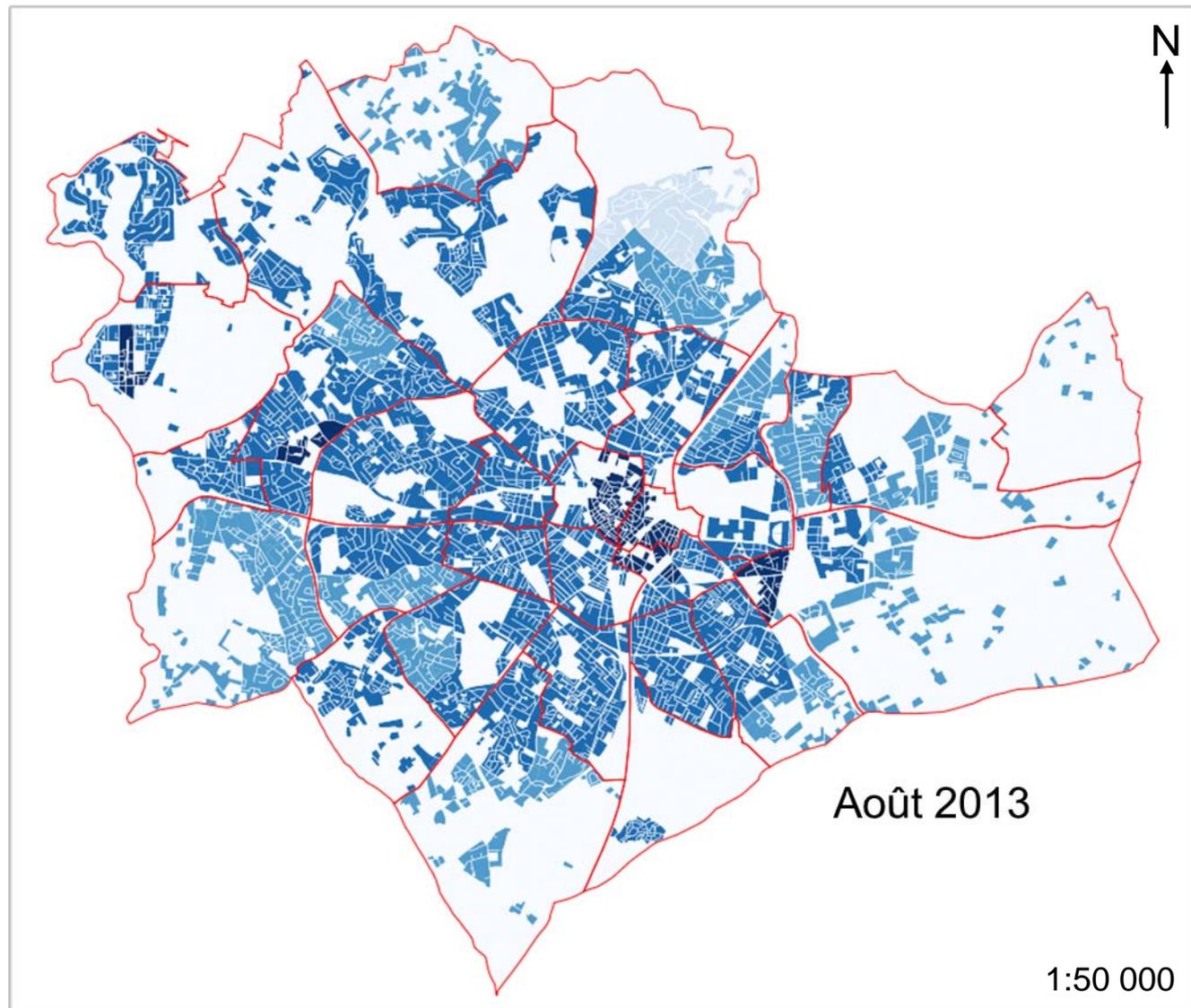
Août 2013

1:50 000

Carte de vulnérabilité



- Vulnérabilité très faible
- Vulnérabilité faible
- Vulnérabilité moyenne
- Vulnérabilité forte
- Vulnérabilité très forte

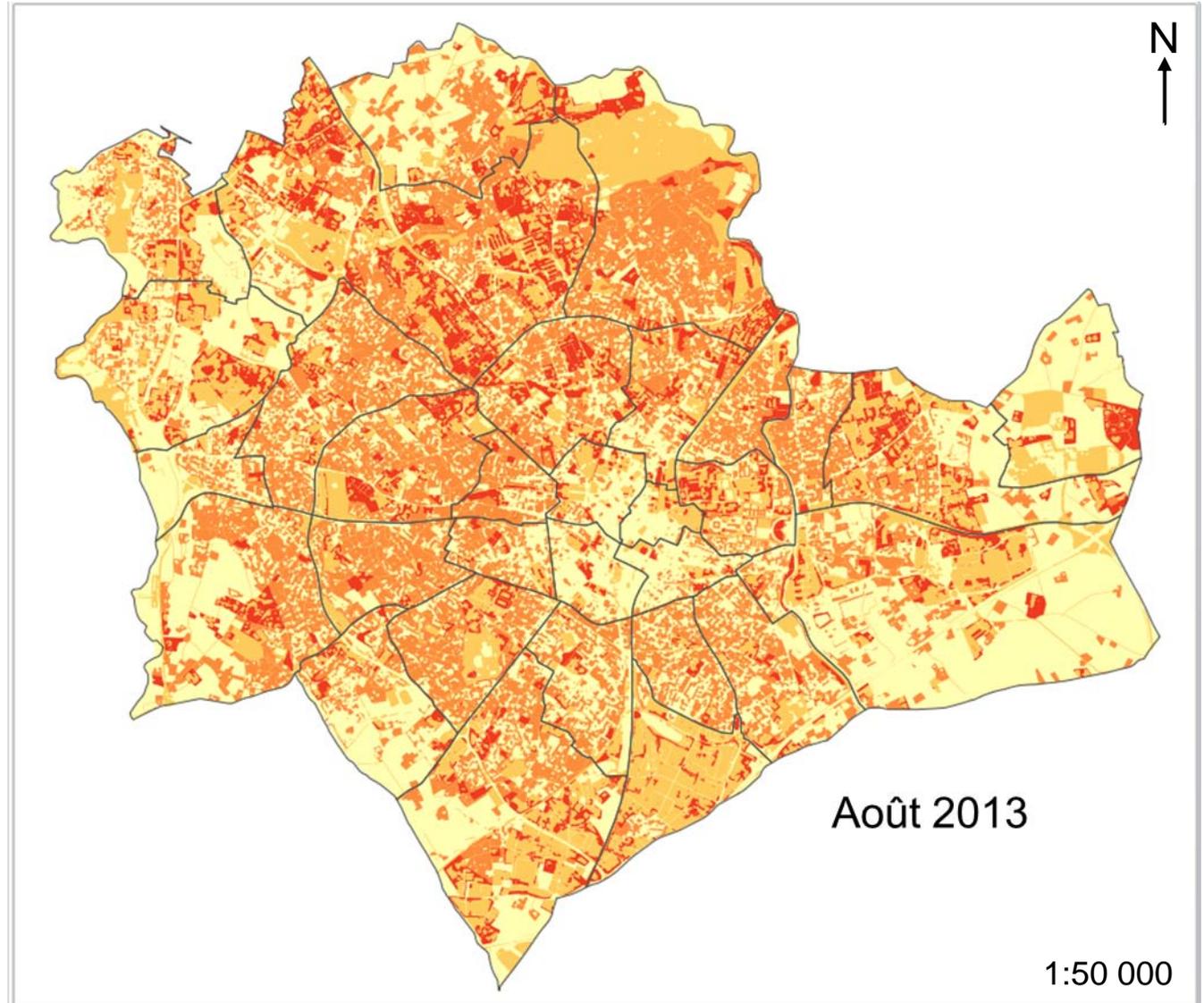


Carte de risque



- Risque très faible
- Risque faible
- Risque moyen
- Risque fort
- Risque très fort

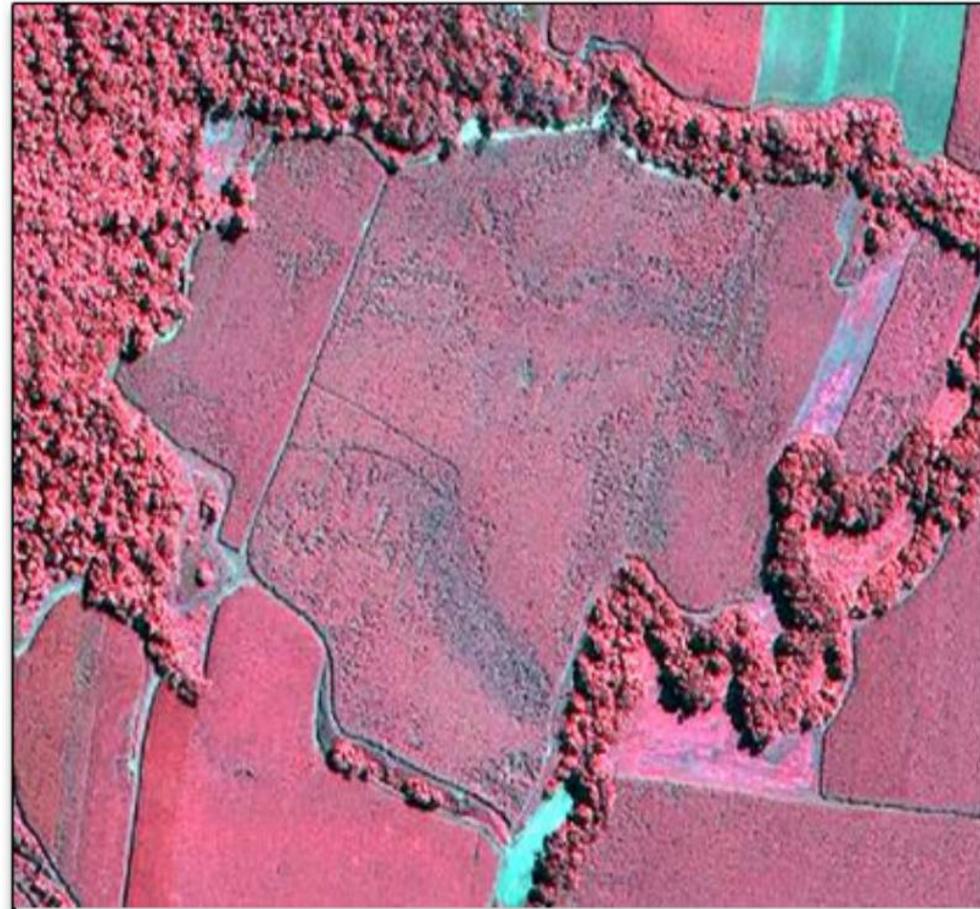
NB : Pour Montpellier en 2013 pas de **Risque très fort** identifié par l'outil



Discussion (5)

- Des outils communs : épidémiologie végétale/animale/humaine

Influence de la végétation sur la distribution spatiale des infestations du ver blanc sur la canne à sucre (Australie)





Remerciements

- AGIRs
- TETIS
- CIRAD
- Groupe « santé environnement télédétection », MTD
- Tous les partenaires

Et merci de votre attention !