APPLICATION DE LA TÉLÉDÉTECTION À L'ÉVALUATION DU RISQUE D'ÉMERGENCE D'UNE MALADIE VECTORIELLE : INTRODUCTION ET DIFFUSION DANS LE SUD DE LA FRANCE DE *CULICOIDES IMICOLA*, VECTEUR DE LA FIÈVRE CATARRHALE DU MOUTON

Annelise TRAN[1,2], Hélène GUIS[1,2,3], Bruno BARRAGUÉ[1,2], Bruno MATHIEU[4], Marie-Laure SETIER-RIO[4]

[1] Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement, Unité Mixte de Recherche « Territoires, Environnement, Télédétection et Information Spatiale », Maison de la Télédétection, 500 rue Jean-François Breton, 34 093 Montpellier Cedex 5, France.
[2] Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement, Unité « Epidémiologie et Ecologie des Maladies Animales », Campus international de Baillarguet, 34 398 Montpellier Cedex 5, France.
[3]Département de santé publique, Unité Biostatistiques et épidémiologie, Faculté de Médecine, CHU S[t] Jacques, 2 place S[t] Jacques, 25 030 Besançon Cedex, France. Tel : +33 3 81 21 87 38 ; Fax : +33 3 81 21 87 35
[4] EID Méditerranée, 165 avenue Paul Rimbaud, 34 184 Montpellier Cedex 4, France.

Soumis le 1er février 2007 ; révisé le 22 mars 2007 ; accepté le 3 avril 2007- © *Revue Télédétection*, 2007, vol. 7, n° 1-2-3-4, p. 419-432

Résumé

Cette étude a pour objet la définition d'un indicateur spatialisé de risque de diffusion du moucheron vecteur de la fièvre catarrhale du mouton (FCM), dans la région de Roquebrune-sur-Argens, département du Var (France). La FCM est une maladie virale affectant les ruminants, principalement les ovins. Son émergence dans l'ouest du bassin méditerranéen depuis 1998 peut être reliée à l'expansion de l'aire de répartition de son vecteur principal, le moucheron Culicoides imicola. *L'installation réussie de populations de* C. imicola *dans le département du Var, confirmée en 2005, augmente considérablement le risque d'introduction du virus de la FCM dans cette région. Afin de contribuer à l'évaluation de ce risque, des outils géomatiques ont été utilisés ici pour cartographier les zones où* C. imicola *s'est potentiellement installé après son introduction dans la zone côtière. Considérant que la topographie et la catégorie de couvert végétal sont les principaux facteurs influant sur la dispersion des* Culicoides *à partir d'un point d'introduction, un indice de risque de diffusion a été développé tant à partir de paramètres extraits d'un modèle numérique d'altitude et de la classification d'une image satellitaire HRG de SPOT-5 à haute résolution spatiale, qu'à partir de données de piégeages entomologiques effectués en 2004. Les valeurs de cet indice ont ensuite été comparées avec les données de piégeages entomologiques réalisés en 2005. Les résultats montrent une bonne concordance entre les valeurs de l'indice calculé et l'abondance de* C. imicola *observée en 2005. Les perspectives de cette étude, qui souligne l'intérêt d'intégrer les outils géomatiques, dont la télédétection, dans les programmes de surveillance des maladies émergentes, sont discutées.*

Mots-clés : télédétection, système d'information géographique, épidémiologie, maladie émergente, fièvre catarrhale du mouton, *Culicoides imicola*

USE OF REMOTE SENSING TO ASSESS THE RISK OF EMERGENCE FOR A VECTOR-BORNE DISEASE: INTRODUCTION AND DIFFUSION OF *CULICOIDES IMICOLA*, BLUETONGUE VECTOR IN SOUTHERN FRANCE

Abstract

The objective of this study was to define a spatial risk index for the diffusion of the vector of bluetongue disease (BT), in the region of Roquebrune-sur-Argens, Var department, France. BT is a viral disease affecting ruminants, mainly sheep; it is transmitted by the bites of certain species of Culicoides *biting midges (*Diptera *:* Ceratopogonidae). *The emergence of BT in the western Mediterranean Basin since 1998 is linked to the northward expansion of* Culicoides imicola*, the main BT virus vector in Europe. The recent installation of populations of* C. imicola *in the Var, which was confirmed in 2005, led to reconsider the BT risk for this region. In order to assess the risk for BT emergence in this region, geomatic tools were used to map the areas of potential settlement of* C. imicola*, following its introduction on the coast. Indeed, as there is some evidence that* Culicoides *species can be passively dispersed by the wind, up to several hundred kilometers,* C. imicola *populations may be transported from Corsica, where this species is present, to the French mainland coast.*

Relatively little is known on the ecology of C. imicola*, but topography and land cover are considered as the main factors driving the dispersal of* Culicoides*. Thereby the calculation of the risk index for the diffusion of* C. imicola *was based on parameters derived from a Digital Elevation Model (DEM) and from the classification of a high spatial resolution SPOT-5 HRG satellite image. Three main classes of land cover were defined according to their level of closure, given the assumption that* C. imicola *is more likely to spread in open landscapes (prairies, cultivated areas) than in closed landscapes (forests). The DEM from the Shuttle Radar Topographic Mission was used to delineate watersheds and calculate a distance along a flow path weighted by land cover type. Finally, results of entomological trappings from October 2004 were used to define the risk of introduction and diffusion for each watershed within the study area. The values of the diffusion risk index were compared with entomological data from 2005 for validation (38 traps). Results highlight a good agreement between the risk index values and the observed abundance of* C. imicola*. This seems to confirm the validity of our hypotheses concerning the dispersal of* C. imicola *and the importance of topographic and land cover parameters. Moreover, the diffusion risk map presents in a synthetic way the spatial distribution of this species for which the installation process in this area is ongoing. Nevertheless, the diffusion risk index defined here is not sufficient to explain the distribution of this BT main vector. Further studies are needed to evaluate landscapes at risk and assess the vectorial capacity of* C. imicola *in the Var department. Perspectives of this study for BT risk assessment in southern France are discussed. More generally, this survey stresses the need to develop geographic approaches to study the spatial expansion of vector species and to integrate geomatic tools in the framework of surveillance and control programs for emerging diseases.*

Key-words: Remote sensing, Geographic Information System, Epidemiology, Emerging disease, Bluetongue, *Culicoides imicola.*

1. INTRODUCTION

Les maladies émergentes peuvent être définies comme des maladies dont le taux d'incidence (le nombre de nouveaux cas dans une population donnée par unité de temps) a significativement augmenté par rapport à la situation épidémiologique habituelle, ou risque d'augmenter dans un avenir proche (Toma and Thiry, 2003). Nombre de ces maladies sont des maladies à transmission vectorielle, c'est-à-dire transmises à un hôte vertébré (homme ou animal) par la piqûre d'un arthropode hématophage, désigné sous le nom de vecteur. En effet, les vecteurs sont particulièrement sensibles aux changements écologiques, tels que le réchauffement climatique et la modification des écosystèmes due aux activités humaines, qui peuvent remodeler leur aire de répartition et favoriser la propagation des maladies qu'ils transmettent (Gubler *et al*., 2001 ; Rogers and Randolph, 2006). C'est le cas par exemple de l'émergence récente de la fièvre catarrhale du mouton (FCM) dans le bassin méditerranéen (Baldet *et al*., 2005 ; Purse *et al*., 2005).

La FCM, également désignée sous le nom de fièvre catarrhale ovine ou *bluetongue* en anglais, est une maladie virale affectant les ruminants, notamment les ovins. Elle fait partie des maladies à notifier à l'Office international des épizooties (Organisation mondiale de la santé animale) (OIE, 2007), du fait de ses conséquences économiques majeures pour l'élevage, tant en termes de santé animale que de répercussions sur les échanges commerciaux.

La FCM est une maladie vectorielle, transmise par la piqûre de moucherons femelles de certaines espèces du genre *Culicoides* (*Diptera* : *Ceratopogonidae*), L'aire de répartition et la dynamique saisonnière de la FCM sont donc étroitement liées à celles de ces moucherons vecteurs.

Dans l'ouest du bassin méditerranéen, la propagation de la maladie depuis 1998 peut être reliée à l'expansion septentrionale du moucheron *Culicoides imicola* Kieffer 1913. Plusieurs flambées épizootiques de FCM ont ainsi touché la Tunisie, l'Algérie, l'Italie (Sicile, Sardaigne et la péninsule elle-même), la Corse (France), le Maroc et l'Espagne (Gomez-Tejedor, 2004). *C. imicola* est un vecteur tropical, d'origine sub-saharienne, dont la dispersion récente et rapide à travers le bassin méditerranéen s'expliquerait par sa capacité à être transporté passivement par les vents sur de longues distances (Alba *et al.*, 2004 ; Gerbier *et al.*, 2006). Ce vecteur majeur de la FCM, présent de

l'Afrique du Sud au Maghreb, du Proche-Orient à l'Inde et à l'Asie du Sud-Est et, plus récemment, dans une grande partie du pourtour méditerranéen, semble capable de s'adapter à des conditions écologiques très variées (Mellor *et al*., 2000). Pourtant, sa bio-écologie demeure encore mal connue (Groupe d'experts entomologistes, 2003). Les gîtes larvaires sont probablement constitués par de la matière organique en décomposition sur substrat humide (excréments d'animaux), mais demeurent à caractériser (Meiswinkel *et al*., 2004). Le développement larvaire dure de une à plusieurs semaines en fonction des conditions du milieu. Seule la femelle adulte se nourrit de sang et sa longévité est estimée à 10-20 jours avec un maximum de 50, en fonction des conditions abiotiques. Son activité est essentiellement nocturne et dépend étroitement de la température avec une plage d'activité comprise entre 18 °C et 38 °C (Sellers and Mellor, 1993). La dispersion active varie de quelques centaines de mètres à quelques kilomètres (Mellor *et al*., 2000). L'étendue de la dispersion passive par les vents peut être très importante, jusqu'à 700 km d'après certains auteurs (Sellers, 1980 ; Braverman and Chechik, 1996). Certains vents, de vitesse comprise entre 10 et 40 km/h à des températures compatibles avec la survie des insectes et pouvant sévir jusqu'à 2 000 m d'altitude, rendent donc possible la diffusion au-dessus des mers de *C. imicola*. Par exemple, en Catalogne, des populations de *C. imicola,* provenant probablement des îles Baléares, se sont récemment installés (Sarto i Monteys *et al*., 2005) de même qu'en Corse (Gerbier *et al*., 2007). La diffusion continentale à l'intérieur des terres de ces populations se fait de manière plus progressive (Calvete *et al*., 2006).

En France, *C. imicola* a été détecté pour la première fois en Corse en 2000 (Delécolle et de la Rocque, 2002). Afin de surveiller son éventuelle introduction sur le littoral continental méditerranéen français, un système de surveillance entomologique y a été mis en place dès 2002 (Baldet *et al*., 2005 ; Cirad, 2007). Il a permis de détecter l'introduction de *C. imicola,* en 2004, à l'est du département du Var (Roquebrune-sur-Argens) (Mathieu *et al*., 2004 ; Biteau-Coroller *et al*., 2006). Son installation a ensuite été confirmée, en 2005, grâce à un suivi hebdomadaire (Biteau-Coroller *et al*., 2006). Des piégeages entomologiques, réalisés dans la zone infestée de Roquebrune-sur-Argens avec un maillage spatial plus fin, ont permis de suivre l'extension de ce vecteur entre 2004 et 2005. À ce jour, ce département est toujours exempt de la maladie, mais la présence d'une population installée du vecteur *C. imicola* et la proximité géographique relative de la Corse a conduit à classer cette zone comme zone à haut risque d'introduction du virus de la FCM. Dans ce contexte, la mise au point d'outils visant à modéliser la diffusion des populations de *C. imicola* semble nécessaire pour, d'une part, contribuer à la compréhension de l'écologie de ce vecteur et, d'autre part, déterminer les zones et les périodes les plus à risque afin d'optimiser la surveillance et les stratégies de contrôle (prévention, vaccination).

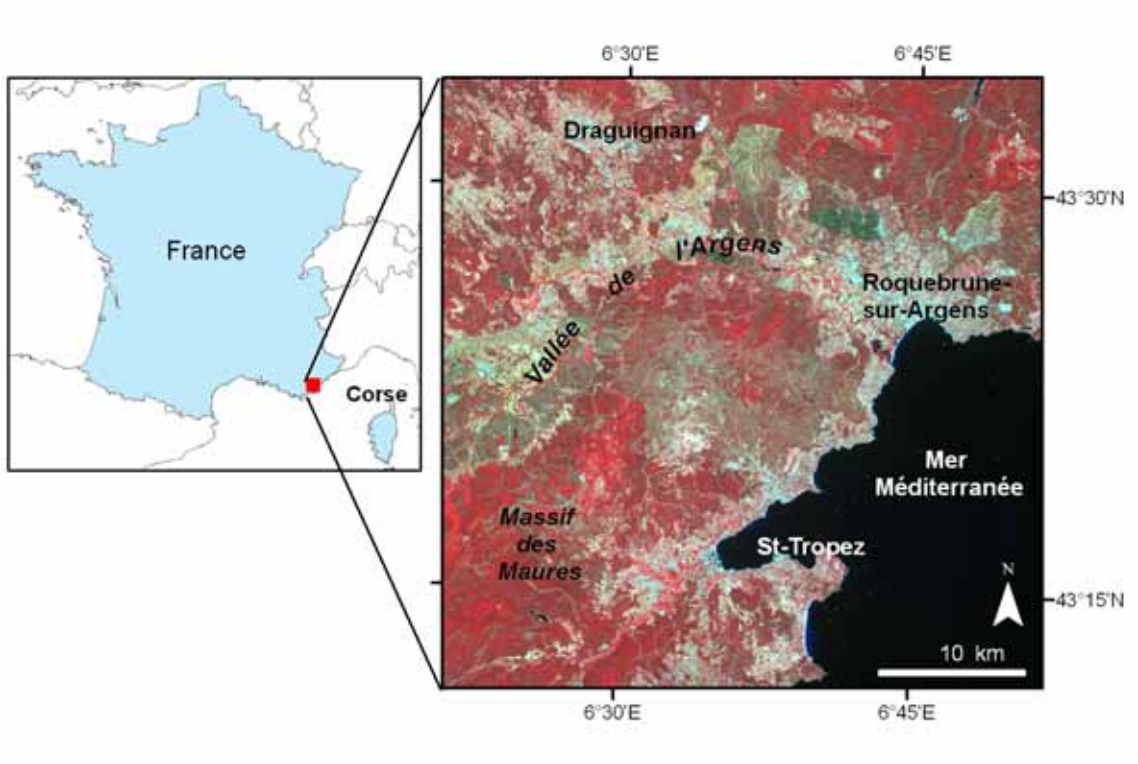
Plusieurs modèles géographiques ont été développés à partir de données météorologiques et satellitaires à basse résolution spatiale (taille de pixel de l'ordre du kilomètre carré), permettant d'obtenir des cartes de probabilité de présence de *C. imicola* à une échelle continentale (Wittman *et al*., 2001 ; Roger, 2002 ; Tatem *et al*., 2003). Cependant, une des limites de ces modèles est qu'ils ne permettent pas d'expliquer des différences de répartition observées à une échelle locale, telles que celles observées dans le Var (Tran *et al*., 2005).

Plus récemment, une étude utilisant des données de télédétection à haute résolution spatiale (imagerie HRG de SPOT) a mis en évidence le rôle de facteurs écologiques sur le risque d'infection dans le sud de la Corse par une analyse statistique des relations entre le statut épidémiologique (infecté ou sain) d'élevages ovins et différents facteurs liés à la structure du paysage et aux caractéristiques des élevages (Guis *et al*., 2007). Cependant, les résultats de cette étude, basée sur des données épidémiologiques recueillies au cours des épizooties de FCM ayant sévi en Corse entre 2000 et 2003, ne peuvent être appliqués tels quels dans le Var, où le vecteur est présent en l'absence du virus.

L'objectif de la présente étude est donc de mettre au point un indice du risque de diffusion de *C. imicola* dans la région de Roquebrune-sur-Argens, afin de contribuer à l'évaluation du risque d'émergence de la FCM dans cette région. Considérant que la diffusion des populations de *C. imicola* est liée à la topographie et à la catégorie de couvert végétal, cet indice a été défini à partir de paramètres dérivés d'un modèle numérique d'altitude (MNA) et de la classification d'une image satellitaire à haute résolution spatiale. Les données entomologiques d'octobre 2004 ont été utilisées pour paramétrer cet indicateur par bassin versant. L'évaluation de cet indice a ensuite été réalisée en comparant ses valeurs avec les résultats des piégeages entomologiques d'octobre 2005.

2. DESCRIPTION DE LA ZONE D'ÉTUDE

La zone d'étude est située à l'est du département du Var, centrée sur la vallée de l'Argens, et couvre une surface de 40 x 42 km (figure 1). Elle est bordée à l'est par la mer Méditerranée, au sud et au nord-est par les massifs des Maures et de l'Esterel. Elle est constituée de zones agricoles essentiellement viticoles, de zones de végétation arbustive méditerranéenne, de zones forestières (pinède, forêt de feuillus) et de zones urbaines. L'altitude est comprise entre le niveau de la mer et 670 m. La distance entre cette zone et la Corse est d'environ 180 km, ce qui rend possible l'introduction dans cette vallée de populations de moucherons *C. imicola,* portés par les vents.



Données SPOT / Programme ISIS, © CNES (2005), distribution Spotimage S.A.

Figure 1 : Localisation de la zone d'étude, région de Roquebrune-sur-Argens, département du Var, France. Fonds de carte : image HRG1 de SPOT-5, 11 juillet 2005. *Location of the study area, Roquebrune-sur-Argens, Var Department, France. Image: HRG1-SPOT5 imagery, 11th July 2005.*

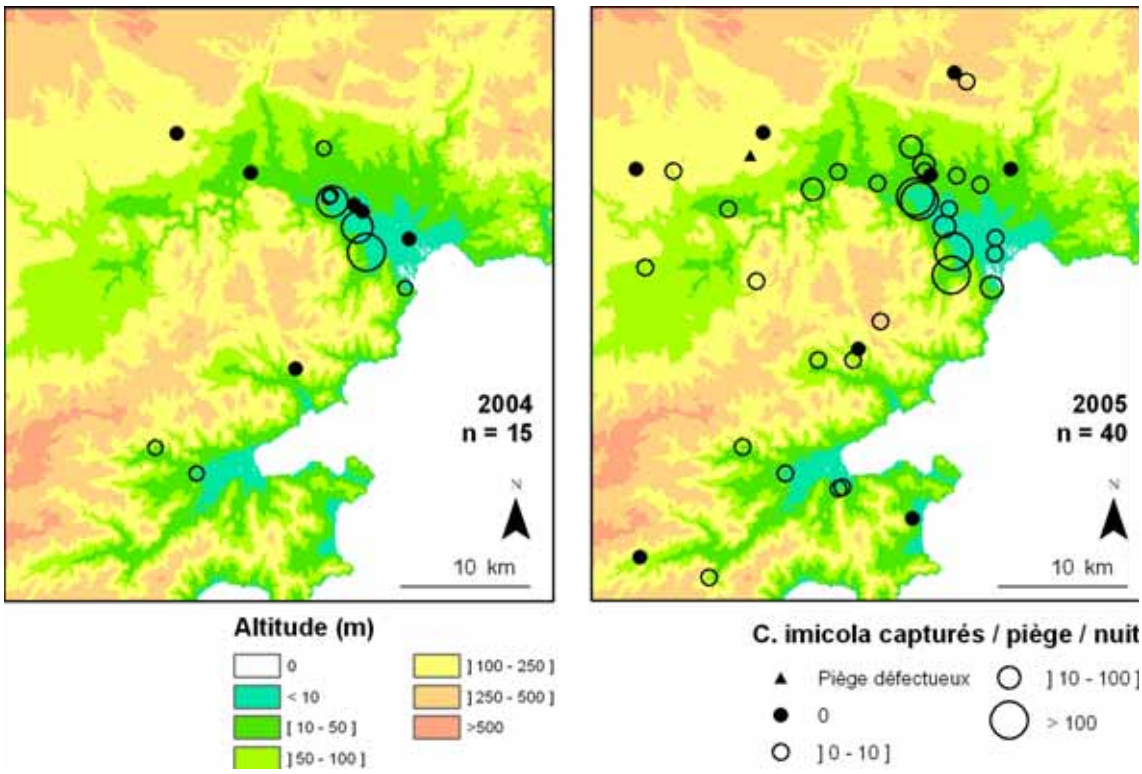
3. MATÉRIEL ET MÉTHODES

Dans cette partie sont détaillés le recueil des données entomologiques relatives à *C. imicola* dans le Var, la caractérisation de l'occupation des terres et de la topographie de la zone d'étude, le calcul d'un indicateur de risque de diffusion des populations de *C. imicola* et, enfin, l'évaluation de cet indicateur en utilisant les données entomologiques de terrain.

3.1. Données entomologiques

Des campagnes de capture ont été effectuées en 2004 et 2005 pour étudier la répartition de *C imicola* dans la zone d'étude, dans le cadre de la surveillance entomologique mise en place en France par le Ministère de l'agriculture. Les captures ont été réalisées en automne (fin septembre - octobre), période durant laquelle les pics d'abondance de *C. imicola* sont habituellement observés en région méditerranéenne (Mellor *et al*., 2000), ce qui a été vérifié à Roquebrune-sur-Argens en 2005 (Biteau-Coroller *et al*., 2006).

Sur la figure 2, on présente la localisation des sites de capture pour les deux années de piégeage. Les sites ont été choisis parmi les élevages recensés dans la zone (ovins, bovins, caprins, équins). En effet, en région méditerranéenne, *C. imicola* est une espèce essentiellement inféodée aux élevages où elle trouve à la fois le « gîte » (gîtes larvaires riches en matières organiques) et le « couvert » (hôte pour assurer le repas de sang des femelles). Les élevages constituent ainsi les meilleurs sites d'échantillonnage pour *C. imicola*. Pour les deux années, les piégeages ont été réalisés pendant plusieurs nuits consécutives durant lesquelles les conditions météorologiques (absence de vent et de précipitation) ont été favorables, stables et comparables.



Données d'altitude : Shuttle Radar Topography Mission, Source : International Centre for Tropical Agriculture

Figure 2 : Résultats des piégeages de *Culicoides imicola* réalisés dans la région de Roquebrune-sur-Argens, France, en octobre 2004 et 2005 sur une carte d'altitudes. *Results of* Culicoides imicola *trappings, Roquebrune-sur-Argens, France, October 2004 and 2005 on an elevation map.*

Pour chaque site, une nuit de piégeage a été réalisée, à l'aide de pièges lumineux à ultraviolets OVI standard, développés pour échantillonner des *Culicoides* à activité nocturne ou crépusculaire. Les pièges étaient placés à l'extérieur, à 1,5 m de hauteur, à proximité immédiate des bâtiments d'élevage. Ils étaient mis en place avant le coucher du soleil et relevés le lendemain matin. Un flacon rempli de 300 ml d'eau savonneuse était adapté sous le piège et ramené au laboratoire où tous les insectes piégés étaient alors transvasés et conservés à 4 °C, dans de l'alcool à 95 °, et ce jusqu'au tri.

L'identification morphologique des différentes espèces de *Culicoides* piégés a été réalisée par examen à la loupe binoculaire des dessins alaires. Pour chaque espèce, le nombre total d'individus a été dénombré. Sur le tableau 1, on résume les résultats des piégeages pour *C. imicola*, considéré comme le principal vecteur de FCM dans cette région.

Tableau 1 : Résumé des résultats des piégeages de *Culicoides imicola* réalisés en octobre 2004 et septembre - octobre 2005 dans la zone d'étude de Roquebrune-sur-Argens, France. *Summary of the results of* Culicoides imicola *trappings, in October 2004 and September October 2005, in the study area of Roquebrune-sur-Argens, France.*

Année	Période de capture	Nombre de sites	Nombre de sites positifs à *C. imicola* [% total]	Moyenne de piégeages[1]
2004	18-28 octobre	15	9 [60,0]	15,9
2005	26 sept. - 6 oct.	40	30 [78,9]	122,0

[1]Exprimé en moucherons par piège et par nuit

La distribution et l'abondance répartie en quatre classes d'effectifs croissants (aucun spécimen, 1 et 10, 10 et 100, plus de 100) de C. *imicola* en 2004 et 2005 sont présentées sur la figure 2.3.2. Cartographie de l'occupation des terres

Considérant, qu'en fonction de la catégorie d'occupation des terres, certains milieux sont plus ou moins favorables à la dispersion des *Culicoides*, une cartographie de l'occupation des terres dans la zone d'étude a été obtenue à partir d'une

image satellitaire HRG de SPOT-5 (tableau 2), prise en 2005, année correspondant à celle de l'étude entomologique. Une classification dirigée orientée objet des principales catégories d'occupation des terres dans la zone d'étude a été effectuée à l'aide du logiciel Definiens-imaging eCognition™ (Munich, Allemagne). Les zones d'apprentissage nécessaires à ce type de classification ont été déterminées à partir de relevés sur le terrain effectués en juin 2006. Des parcelles de validation, destinées à évaluer la qualité de la classification, ont également été identifiées sur le terrain.

Tableau 2 : Caractéristiques des données satellitaires utilisées. *Characteristics of the satellite data used in the study.*

Données	Satellite (capteur)	Taille de pixel (m)	Bandes spectrales (μm)	Source
Modèle numérique d'altitude	Shuttle Radar Topography Mission	90	-	NASA / USGS. Distribution : International Centre for Tropical Agriculture. Données disponibles à partir de la base de données CGIAR-CSI SRTM 90 m sur le site internet http://srtm.csi.cgiar.org
Image optique du 11 juillet 2005	SPOT-5 (HRG-1)	10	0,79-0,89 0,61-0,68 0,50-0,59 1,58-1,75	Centre national d'études spatiales, programme ISIS, distribution SpotImage S.A.

Sept catégories d'occupation des terres ont ainsi été cartographiées, puis regroupées en trois catégories en fonction de leur caractère propice ou non à la dispersion de *C. imicola* (tableau 3). Pour cela nous avons fait l'hypothèse que cette dispersion était dépendante du degré d'ouverture du paysage (milieu ouvert, semi-ouvert, fermé), les milieux fermés, tel que les forêts, étant considérés comme peu propices à la dispersion de *C. imicola*, au contraire des milieux ouverts, tels que les prairies.

Tableau 3 : Liste des catégories d'occupation des terres provenant de la classification de l'image HRG de SPOT-5 et catégorie de milieu associé. *Land cover classes derived from the SPOT-5 HRG image and associated closure index.*

Occupation des terres	Catégorie de milieu	Poids
Prairie	Ouvert	1
Cultures	Ouvert	1
Eau	Ouvert	1
Zone non végétalisée (milieux urbain et péri-urbain)	Semi-ouvert	2
Végétation arbustive rase	Semi-ouvert	2
Forêt de feuillus et maquis	Fermé	3
Pinède	Fermé	3

3.3. Calculs d'indices topographiques

C. imicola étant difficile à étudier, les conditions favorables à sa dispersion sont mal connues. Cependant, des études menées sur d'autres espèces de *Culicoides* ont montré l'effet de l'altitude et de la distance à la plaine côtière sur la dispersion de ces moucherons (Bishop *et al*., 2004). En particulier, dans des zones de relief marqué, les limites des vallées constituent des barrières géographiques à la dispersion des *Culicoides* et déterminent leur répartition.

Pour notre zone d'étude, un MNA a donc été utilisé tant pour délimiter la limite des bassins versants que pour calculer, en chaque point de la zone d'étude, la distance à la plaine côtière le long d'un chemin de flux. Ce MNA provient des données de la mission Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM) (tableau 2). La délimitation des bassins versants ainsi que le calcul de la distance à la mer ont été effectués à l'aide des outils de modélisation hydrologique du logiciel de système d'information géographique (SIG) ESRI ArcGis™ (Redlands, CA, USA).

L'indice de distance à la mer (***D***) correspond à la distance calculée le long d'un chemin de flux afin de prendre en compte l'influence de la topographie sur la progression des populations de *Culicoides*, pondérée par la catégorie de milieu (ouvert, semi-ouvert, fermé) déterminé précédemment (section 3.2). Le calcul de distance le long d'un chemin de

flux est effectué pour chaque point de la zone d'étude à partir de la direction d'écoulement calculée pour chaque pixel à partir du MNA et d'un coefficient de pondération par le milieu. Le chemin reliant le point considéré à la mer est tout d'abord déterminé en fonction de la grille des directions d'écoulement. Ensuite, à chaque cellule de ce chemin un poids est affecté en fonction du milieu auquel elle appartient (tableau 3). Le résultat pour chaque point de la zone d'étude (l'indice D) est la somme des poids des cellules de ce chemin (Jenson and Domingue, 1988 ; ESRI ArcGIS Desktop 9.2 Help, 2007).

L'affectation à un bassin versant de tout point de la zone d'étude permet de grouper les localisations ayant un historique comparable concernant l'introduction de *C. imicola.* Pour chaque bassin versant, un indicateur de risque de diffusion sera calculé, intégrant notamment l'indice topographique ***D*** (section 3.4).

3.4. Calcul d'un indicateur spatialisé du risque de diffusion des populations

Afin de contribuer à évaluer le risque de présence du vecteur de la FCM dans la zone d'étude, un indicateur spatialisé du risque de diffusion de *C. imicola* dans cette zone est proposé, à partir des hypothèses suivantes, établies d'après la littérature (Sellers, 1980 ; Braverman and Chechik, 1996 ; Bishop *et al*., 2000) et de connaissances à dire d'expert sur les *Culicoides* :

- tout d'abord, le moucheron *C. imicola* peut être transporté de manière passive par les vents sur de longues distances au-dessus de la mer et, ainsi, être introduit dans de nouvelles zones ; dans le cas de notre zone d'étude, la région la plus proche possédant des populations installées de *C. imicola* étant la Corse, les lieux d'introduction les plus probables sont donc les zones littorales ;

- d'autre part, l'altitude et la catégorie d'ouverture du milieu conditionnent le potentiel de dispersion continentale des populations de *C. imicola* à partir des lieux d'introduction (sections 3.2 et 3.3) ; dans la zone d'étude, la diffusion des populations de *C. imicola* s'effectue donc à partir des zones littorales, en remontant dans les vallées, d'autant plus rapidement que les milieux traversés sont ouverts ;

- enfin, le terme hydrologique de « bassin versant » correspond à une unité spatiale homogène au regard du risque d'introduction et de diffusion de *C. imicola.*

Considérant uniquement les hypothèses 1 et 2, l'indice de distance ***D*** défini précédemment est un indice inversement proportionnel au risque que des populations de *C. imicola* aient atteint un point donné à partir d'une introduction potentielle sur la zone côtière.

Afin d'affiner cet indice, pour chaque bassin versant, nous avons défini pour chaque bassin versant (hypothèse 3) : (i) un indice de risque d'introduction, (ii) un indice de risque de dispersion et, pour les bassins versants où des populations de *C. imicola* sont déjà présentes, (iii) une distance d'introduction.

L'indice de risque d'introduction (***i_int***) est défini pour chaque bassin comme la probabilité que de nouveaux individus de *C. imicola* soient introduits depuis la Corse. Cet indice dépend de l'orientation du bassin avec la direction Var-Corse, qui est orientée vers le sud-est, ainsi que de la longueur de la côte. Trois paramètres ont été pris en compte pour le calcul de *i_int* pour chaque bassin versant et codés par des valeurs entre 0 et 1 : la présence de *Culicoides imicola* dans les pièges de 2004 (absence : 0 ; présence : 1) ; l'orientation du bassin (sud-est : 1 ; sud ou est : 0,25 ; autres directions : 0,01) ; la longueur de la côte (0 : longueur très faible (<100 m) ; 0,5 : longueur moyenne et 1 : très long trait de côte (> 7 km). L'indice *i_int* est le produit de ces trois paramètres (Tableau 4).

Le risque de dispersion (***i_dis***) est défini pour chaque bassin comme la probabilité que des populations de *C. imicola* s'y dispersent depuis des bassins où elles ont été détectées en 2004. Quatre classes de bassins sont différenciées : les bassins où *C. imicola* a été piégé en 2004 (***i_dis*** = 1), les bassins où la présence de *C. imicola* en 2004 est probable (***i_dis***=0,5), les bassins ayant une limite commune avec les bassins où *C. imicola* a été piégé en 2004 (***i_dis*** = 0,25) et les autres (***i_dis*** = 0,1).

Les ordres de grandeur des valeurs de *i_int* et *i_dis* ont été déterminés d'après les hypothèses de dispersion maritime de *C. imicola* par les vents à partir de la Corse et de dispersion continentale de proche en proche à partir d'une zone d'introduction. Ces valeurs correspondent à des risques relatifs entre bassins versants

Pour les bassins dans lesquels *C. imicola* était déjà présent en 2004, la distance d'introduction ***D_int*** est définie pour chaque bassin versant comme la valeur maximale de ***D*** sur l'ensemble des pièges positifs du bassin. Pour ceux dans lesquels *C. imicola* n'était pas présent en 2004, la valeur de ***D_int*** vaut 0.

Finalement, l'indice de risque de diffusion de *C. imicola*, noté $\boldsymbol{I_{RD}}$, est défini par :

$$I_{RD} = \frac{i_\text{int} \times i_dis}{Max(D - D_\text{int}, 0) + 1} \qquad (1)$$

Cet indice varie entre 0 et 1 et peut être interprété en un point donné comme la probabilité que des populations de *C. imicola*, suite à leur introduction sur le littoral confirmée par les piégeages de 2004, se soient dispersées jusqu'au point considéré.

Tableau 4 : Caractéristiques des bassins versants de la zone d'étude. *Characteristics of the watersheds within the study area.*

N°	*C. imicola* en 2004 (codage)	Orientation (codage)	Longueur de la côte en mètres (codage)	*i_int* (indice de risque d'introduction)	*i_dis* (indice de risque de dispersion)	*D_int* (distance d'introduction, en mètres)
1	PRÉSENCE (1)	SE (1)	22901 (1)	1	1	31 200
2	PRÉSENCE PROBABLE (1)	SE (1)	5583 (0,5)	0,83	0,5	13500
3	PRÉSENCE PROBABLE (1)	SE (1)	5529 (0,5)	0,83	0,5	13500
4	PRÉSENCE (1)	E (0,25)	7298 (1)	0,75	1	22 770
5	ABSENCE SUPPOSÉE (0)	E (0,25)	19256 (1)	0,42	0,25	0
6	ABSENCE SUPPOSÉE (0)	E (0,25)	532 (0,5)	0,25	0,1	0
7	ABSENCE SUPPOSÉE (0)	S (0,25)	67272 (1)	0,42	0,1	0
8	ABSENCE SUPPOSÉE (0)	S (0,25)	98 (0)	0,08	0,25	0
9	ABSENCE SUPPOSÉE (0)	E (0,25)	36144 (1)	0,42	0,1	0

3.5. Évaluation

Afin d'évaluer la pertinence de cet indice comme outil visant à mieux anticiper l'expansion de *C. imicola* dans la région de Roquebrune-sur-Argens, les résultats des piégeages entomologiques de 2005 ont été comparés aux valeurs $\boldsymbol{I_{RD}}$ calculées en chacun des sites de piégeages qui n'ont pas servi à la définition de cet indice. Un test de corrélation des rangs de Spearman a été appliqué afin d'évaluer la relation entre le nombre de *C. imicola* capturés par piège et la valeur de l'indice $\boldsymbol{I_{RD}}$ calculé pour ce piège. En effet, il semble plus important d'avoir une estimation de l'ordre de grandeur de la population locale capturée que du nombre exact de *C. imicola* par piège (qui est sous l'influence d'autres paramètres tels que les conditions météorologiques au moment du piégeage). Enfin, pour les quatre classes de résultats de piégeages (aucun *C. imicola*, 1 et 10, 10 et 100, plus de 100), la moyenne et l'écart type de l'indice $\boldsymbol{I_{RD}}$ ont été calculées.

4. RÉSULTATS

Les résultats de la classification de l'image HRG et de la classification en trois catégories de milieux (ouvert, semi-ouvert, fermé) sont présentés sur la figure 3. La qualité de la classification est très bonne, avec un taux de bonne classification de 95 % et un indice de Kappa de 0,95.

Neuf bassins versants ont été délimités dans la zone d'étude (figure 4). Leurs caractéristiques respectives (orientation, résultats des piégeages de 2004, ***i_int, i_dis, D_int***) sont présentées sur le tableau 4. La cartographie de l'indice topographique ***D*** permet d'observer un premier niveau de risque de diffusion des *C. imicola* à partir des zones côtières (figure 5), basé uniquement sur des données environnementales (topographie et occupation des terres), puisqu'elle ne prend pas en compte les données entomologiques.

Les variations spatiales de l'indicateur de risque de diffusion de populations de *C. imicola* (avec prise en compte des résultats des piégeages de 2004) sont présentées sur la figure 6. Cette représentation met en évidence les deux zones où des populations de *C. imicola* étaient déjà installées en 2004 (bassins 1 et 4, en rouge). En dehors de ces zones, l'indice de risque décroît en même temps que la distance pondérée par la catégorie de milieu augmente et à une vitesse variable en fonction des caractéristiques de chaque bassin.

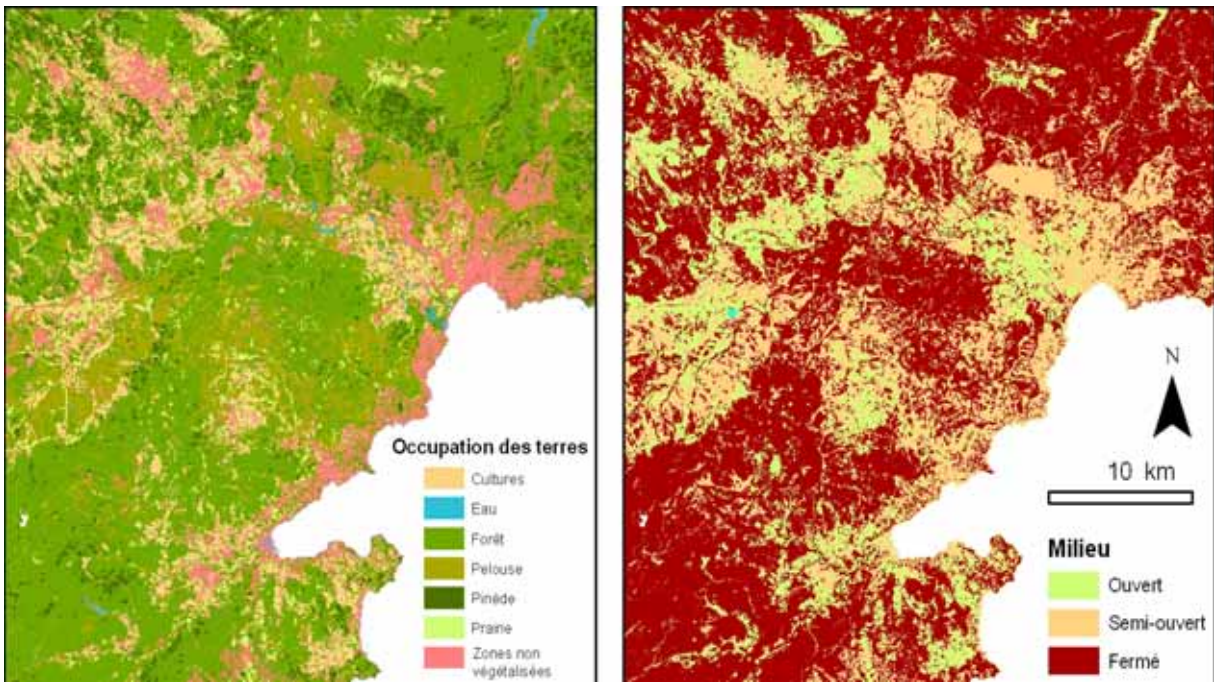


Figure 3 : Classification de l'occupation des terres sur l'image HRG de SPOT de la zone de Roquebrune-sur-Argens, département du Var. *Classification of the landcover on the SPOT HRG image of the Roquebrune-sur-Argens area, Var Department.*

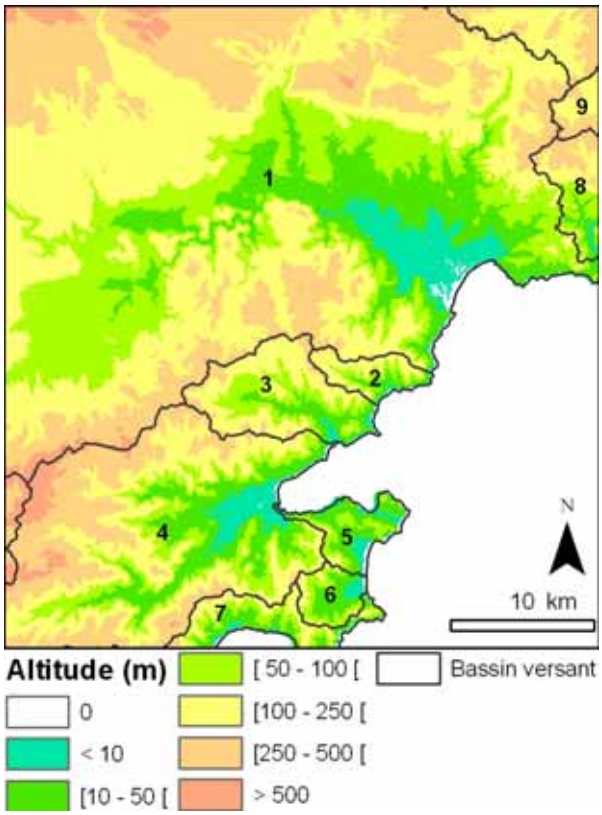


Figure 4 : Limites des bassins versants calculées à partir du modèle numérique d'altitude dans la région de Roquebrune-sur-Argens, département du Var. *Watershed limits derived from Digital Elevation Model data, Roquebrune-sur-Argens region, Var Department.*

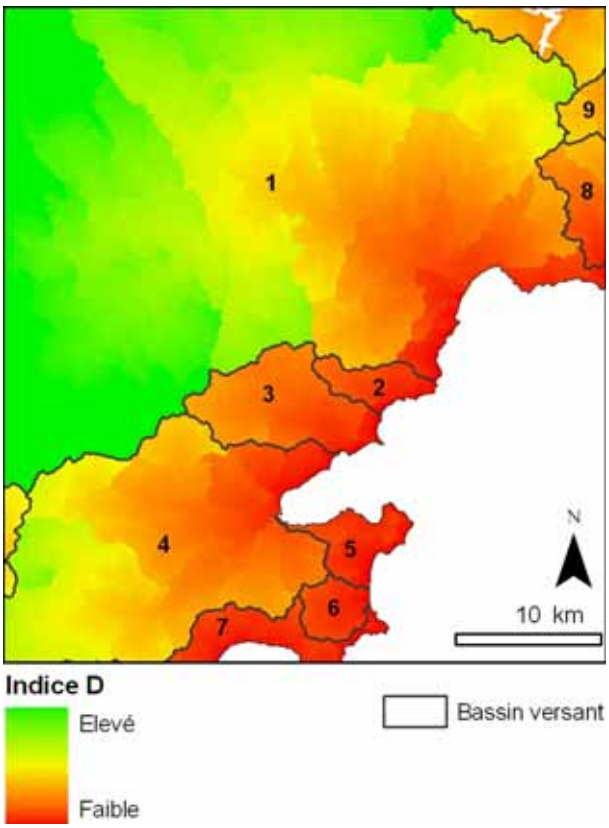


Figure 5 : Répartition de l'indice de distance à la mer le long d'un chemin de flux pondérée par la catégorie de milieu (indice ***D***), région de Roquebrune-sur-Argens, département du Var. *Spatial distribution of the distance index along a flow path weighted by land cover type (D index), Roquebrune-sur-Argens region, Var Department.*

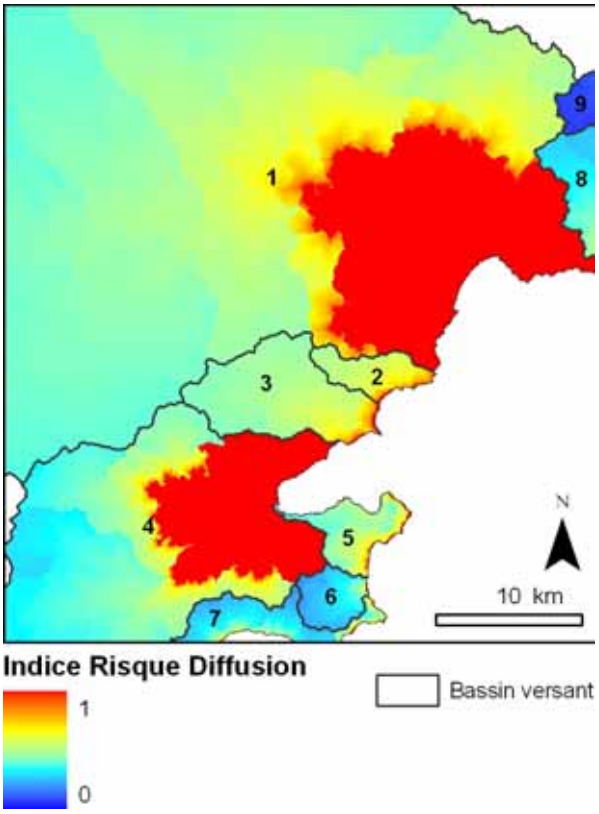


Figure 6 : Répartition de l'indicateur de risque de diffusion de *Culicoides imicola* dans la région de Roquebrune-sur-Argens, département du Var. *Spatial distribution of the diffusion risk index for Culicoides imicola in the Roquebrune-sur-Argens region, Var Department.*

Le coefficient de corrélation de Spearman indique une corrélation positive entre le classement des pièges en fonction du nombre de *C. imicola* capturés et l'indice $\boldsymbol{I_{RD}}$, de risque de diffusion, calculé pour chaque site de piégeage ($R_S = 0,58$; $p < 0,001$). Le calcul de la valeur moyenne de l'indice $\boldsymbol{I_{RD}}$ pour les quatre classes d'abondance croissante de *C. imicola* montre effectivement une augmentation de l'indice en fonction du rang, mais cependant avec des écarts types importants (tableau 5).

Tableau 5 : Valeur moyenne de l'indice de risque de diffusion pour les quatre classes d'abondance. *Mean-value of the risk diffusion index according to the four abundance classes*.

Classe	**Nombre de *C. imicola* / piège**	**Nombre de pièges**	**Valeur moyenne *IRD* (IC95 %)**
1	0	8	0,25 (0 – 0,57)
2	] 0-10]	21	0,48 (0,27 – 0,68)
3	] 10-100]	5	0,80 (0,41 - 1)
4	>100	4	1

IC : Intervalle de confiance à 95 %

5. DISCUSSION

À cause du caractère nouveau et inattendu des maladies émergentes (nouvel agent pathogène, nouveau cycle de transmission ou nouveaux facteurs de risque), on manque souvent de recul et de connaissances sur les déterminants de leur transmission. Afin d'améliorer le dispositif de surveillance et de contrôle d'une maladie vectorielle émergente comme la FCM dans le Var, les techniques de modélisation peuvent être utiles tant pour mieux comprendre les mécanismes d'introduction et de diffusion du vecteur et que pour mettre au point des outils d'aide à la décision : prévision des zones et périodes à risque, simulations d'émergence en fonction de différents scenarii. En particulier, l'utilisation des outils géomatiques permet la prise en compte de la dimension spatiale dans l'évaluation du risque en épidémiologie grâce, par exemple, à la cartographie des zones favorables au développement des vecteurs, à différentes échelles spatiales (Anyamba *et al*., 2002 ; Bouyer *et al*., 2006 ; Eisen *et al*., 2006).

Dans cette étude, nous montrons que l'information dérivée de données de télédétection (altitude, occupation des terres) peut être exploitée pour produire des indices simples permettant d'identifier les zones où la présence du moucheron vecteur de la FCM est possible. En effet, l'analyse des relations entre les valeurs de l'indice de risque de diffusion et les données des piégeages entomologiques montre une corrélation significative. Ces résultats semblent confirmer la validité de nos hypothèses sur la dispersion de *C. imicola* (section 3.4). Ainsi, la carte de risque de diffusion obtenue présente, de manière synthétique (figure 6), le potentiel de diffusion de cette espèce dans la zone.

Cependant cette information est incomplète, car elle correspond à la probabilité que des spécimens *C. imicola* aient pu atteindre un point donné à partir d'une introduction sur la côte, mais elle ne correspond pas à la répartition réelle de *C. imicola* dans la zone. En effet, des sites très proches géographiquement pourront présenter des différences importantes de densités, du fait de l'importance des conditions environnementales locales et des pratiques d'élevage (densité et race animale, gestion des effluents, utilisation d'insecticide, etc.) sur la présence de ce moucheron. Par exemple, *C. imicola*, ayant besoin de substrats humides riches en matières organiques et de repas sanguins pris sur des mammifères pour se reproduire, va préférentiellement s'installer à proximité d'élevages. Des facteurs environnementaux liés à la structure du paysage (ensoleillement moyen, indice de fragmentation des milieux) semblent également susceptibles de déterminer sa présence (Guis *et al*., 2007). L'importance de ces conditions locales explique les fortes disparités des valeurs de notre indice dans les différentes classes d'abondance (tableau 5). Ainsi, dans une zone à fort risque de diffusion ($\boldsymbol{I_{RD}}$ proche de 1), certains pièges présentent des densités de *C. imicola* faibles ou nulles, probablement du fait de l'existence de conditions locales défavorables à sa présence (pratiques d'élevage, type de sol, etc.).

L'identification des conditions favorables à l'installation de *C. imicola* s'avère donc nécessaire pour compléter ce travail et obtenir une carte plus précise de la répartition du vecteur de la FCM dans cette région. Le plus souvent, pour obtenir ce genre de carte, on s'appuie sur l'analyse de corrélation entre les résultats des piégeages entomologiques et des paramètres environnementaux (Achee *et al*., 2006 ; Munga *et al*., 2006 ; Vanwambeke *et al*., 2007). Cette analyse n'a pas pu être réalisée ici, en raison des difficultés d'interprétation soulevées par une telle approche dans le cas d'un processus d'installation récent et en cours. En effet, dans ce cas, certains piégeages pourront être négatifs, non pas parce qu'ils présentent des conditions défavorables à la présence du vecteur considéré, mais du fait que celui-ci ne s'est pas encore dispersé jusque-là. L'identification de l'indicateur de risque de diffusion constitue donc un prérequis nécessaire

pour une telle analyse. Pour améliorer cet indice, une analyse de sensibilité doit être effectuée pour évaluer l'impact des variables ***i_int***, ***i_dis*** et ***D_int*** (dont l'ordre de grandeur a été déterminé d'après nos hypothèses sur la dispersion de *C. imicola* dans la zone étudiée) sur la valeur de l'indice $\boldsymbol{I_{RD}}$ et, dans une phase de calibration, ajuster les paramètres de ces variables de manière à ce qu'ils correspondent mieux aux données entomologiques.

Par ailleurs, afin de tester son caractère générique, cet indice pourrait être appliqué sur d'autres zones géographiques présentant des caractéristiques semblables d'installation puis de diffusion de *C. imicola*, comme la Catalogne (Sarto i Monteys *et al*., 2005 ; Calvete *et al*., 2006).

Une autre perspective à ce travail serait la prise en compte de la dimension temporelle de l'installation des populations de *C. imicola* dans la zone de Roquebrune-sur-Argens, par exemple par l'exploitation d'un modèle spatio-temporel de diffusion (Raffy and Tran, 2005), appliqué non pas de manière uniforme sur l'ensemble de la zone, mais par bassin versant. Un tel modèle dynamique permettrait d'évaluer la vitesse de diffusion de *C. imicola* et de pouvoir étudier sa progression par simulation. À terme, ces données sur la distribution spatio-temporelle des vecteurs de la FCM pourraient être assimilées dans un modèle de la capacité vectorielle de *C. imicola* (Biteau-Coroller *et al*., 2006), qui est un indicateur du risque de transmission d'une maladie habituellement utilisé pour les maladies vectorielles (Garrett-Jones, 1964).

En dehors de la zone du littoral est du Var, dans les zones littorales où *C. imicola* n'est pas encore implanté, la méthode développée dans l'est du Var pour déterminer un indice topographique représentant le potentiel de diffusion de *C. imicola*, indice ***D***, peut également être appliqué pour cartographier ce potentiel dans d'autres zones littorales. En effet, les résultats dans le Var semblent confirmer les hypothèses sur l'influence de la topographie et de l'occupation des terres sur la dispersion de *C. imicola*. De telles cartes permettraient d'augmenter la surveillance entomologique dans les zones où le potentiel de diffusion est le plus fort. L'estimation de ce potentiel apporterait également de précieuses informations pour orienter la surveillance clinique et sérologique de la maladie.

6. CONCLUSION

Une nouvelle approche utilisant la télédétection et les SIG a été développée pour modéliser le risque de diffusion du vecteur de la FCM dans le département du Var. Peu de choses étant connues sur l'écologie de *C. imicola*, le calcul de l'indicateur développé ici repose sur des hypothèses simples sur le type de facteurs influant sur la dispersion de ce moucheron. Les résultats montrent une bonne concordance entre les valeurs de l'indice calculé et les résultats des piégeages entomologiques, confirmant l'importance de la prise en compte de la topographie et de l'occupation des terres pour la compréhension de la répartition de *C. imicola* dans cette région. De manière plus générale, cette étude souligne l'intérêt d'intégrer les outils géomatiques dans les programmes de surveillance et de contrôle des maladies émergentes.

REMERCIEMENTS

Cet article est dédié à Ferdinand Bonn, en hommage à ses travaux dans le domaine de la télédétection. Ferdinand a dirigé mon stage de fin d'études d'ingénieur au Centre d'applications et de recherches en télédétection, à l'Université de Sherbrooke, en 1999. Sa curiosité et son ouverture d'esprit ont contribué à ce que j'envisage ensuite l'application de la télédétection dans des domaines très éloignés de la physique et du traitement du signal, comme l'épidémiologie. Pour sa générosité, sa gentillesse et l'attention qu'il portait au devenir de ses anciens étudiants… Merci.

De manière plus prosaïque, pour cette étude le recueil des données entomologiques a été diligenté et financé par la Direction générale de l'alimentation du Ministère de l'agriculture de France, conduit par le Cirad, avec la collaboration active de l'Université Louis Pasteur de Strasbourg et l'EID-Méditerranée. Les auteurs remercient également le CNES (programme ISIS) pour son co-financement d'acquisition de l'image HRG de SPOT-5.

Références

Achee, N.L., Grieco, J.P., Masuoka, P., Andre, R.G., Roberts, D.R., Thomas, J., Briceno, I., King, R. and Rejmankova, E. (2006) Use of remote sensing and geographic information systems to predict locations of *Anopheles darlingi*-positive breeding sites within the Sibun River in Belize, Central America. Journal of Medical Entomology, vol. 43, n° 2, p. 382-392.

Alba, A., Casal, J. and Domingo, M. (2004) Possible introduction of bluetongue into the Balearic Islands, Spain, in 2000, via air streams. The Veterinary Record, vol. 155, p. 460-461.

Anyamba, A., Linthicum, K.J., Mahoney, R., Tucker, C.J. and Kelley, P.W. (2002) Mapping potential risk of Rift Valley Fever outbreaks in African savannas using vegetation index time series data. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, vol. 68, n° 2, p. 137-145.

Baldet, T., Mathieu, B., Delécolle, J.C., Gerbier, G. et Roger, F. (2005) Emergence de la fièvre catarrhale du mouton dans le Bassin méditerranéen et surveillance entomologique en France. Revue Élevage et Médecine vétérinaire, vol. 58, n° 3, p. 125-132.

Bishop, A.L., Barchia, I.M. and Spohr, L.J. (2000) Models for the dispersal in Australia of the arbovirus vector, Culicoides brevitarsis Kieffer (*Diptera* : *Ceratopogonidae*). Preventive Veterinary Medicine, vol. 47, n° 4, p. 243-254.

Bishop, A.L., Spohr, L.J. and Barchia, I.M. (2004) Effects of altitude, distance and waves of movement on the dispersal in Australia of the arbovirus vector, *Culicoides brevitarsis* Kieffer (Diptera : Ceratopogonidae). Preventive Veterinary Medicine, vol. 65, n° 3-4, p. 135-145.

Biteau-Coroller, F., Guis, H., Mathieu, B., Carpenter, S., Baldet, T. and Roger, F. (2006) Vectorial capacity of *Culicoides imicola* in a new colonised area in southern mainland France. Proceedings of the 11th Symposium of the International Society for Veterinary Epidemiology and Economics, Cairns, Australia: ISVEE, vol. 11, p. 269.

Bouyer, J., Guerrini, L., Desquesnes, M., de la Rocque, S. and Cuisance, D. (2006) Mapping African Animal Trypanosomosis risk from the sky. Veterinary Research, vol. 37, n° 5, p. 633-645.

Braverman, Y. and Chechik, F. (1996) Air streams and the introduction of animal diseases borne on *Culicoides* (Diptera, Ceratopogonidae) into Israel. Revue Scientifique et Technique de l'Office International des Epizooties, vol. 15, n° 3, p. 1037-52.

Calvete, C., Miranda, M.A., Estrada, R., Borras, D., Sarto i Monteys, V., Collantes, F., Garcia-de-Francisco, J.M., Moreno, N. and Lucientes, J. (2006) Spatial distribution of *Culicoides imicola*, the main vector of bluetongue virus, in Spain. The Veterinary Record, vol. 158, n° 4, p. 130-1.

Cirad (2007) Surveillance de la Bluetongue en France. http://bluetongue.cirad.fr/.

Delécolle, J.C. et de la Rocque, S. (2002) Contribution à l'étude des *Culicoides* de Corse. Liste des espèces recensées en 2000/2001 et redescription du principal vecteur de la fièvre catarrhale du mouton : *C. imicola* Kieffer, 1913 (*Diptera* : *Ceratopogonidae*). Bulletin de la Société Entomologique Française, vol. 107, n° p. 371-379.

Eisen, L., Eisen, R.J. and Lane, R.S. (2006) Geographical distribution patterns and habitat suitability models for presence of host-seeking ixodid ticks in dense woodlands of Mendocino County, California. Journal of Medical Entomology, vol. 43, n° 2, p. 415-427.

ESRI ArcGIS Desktop 9.2 Help (2007) Hydrologic analysis.
http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.2/index.cfm?TopicName=Hydrologic_analysis_references.

Garrett-Jones, C. (1964) Prognosis for interruption of malaria transmission through assessment of the mosquito's vectorial capacity. Nature, vol. 204, n° 4964, p. 1173-1175.

Gerbier, G., Baldet, T., Cetre-Sossah, C., Biteau-Coroller, F., Zientara, S. and Roger, F. (2006) Emergence of bluetongue in France 2000-2004 : lessons for surveillance. Proceedings of the 11th Symposium of the International Society for Veterinary Epidemiology and Economics, Cairns, Australia : ISVEE, vol. 11, p. 135-137.

Gerbier, G., Biteau-Coroller, F., Grillet, C., Parodi, J., Zientara, S., Baldet, T., Guis, H. and Roger, F. (2008) Description of the outbreak of bluetongue in Corsica in 2003, and lessons for surveillance. The Veterinary Record, vol. 162, n°6, p. 173-176.

Gomez-Tejedor, C. (2004) Brief overview of the bluetongue situation in Mediterranean Europe, 1998-2004. Veterinaria Italiana, vol. 40, n° 3, p. 57-60.

Groupe d'experts entomologistes (2003) 3rd OIE BlueTongue International Symposium. Veterinaria Italiana, vol. 40, n° 4, p. 715-717.

Gubler, D.J., Reiter, P., Ebi, K.L., Yap, W., Nasci, R. and Patz, J.A. (2001) Climate variability and change in the United States : Potential impacts on vector- and rodent-borne diseases. Environmental Health Perspectives, vol. 109, p. 223-233.

Guis, H., Tran, A., de la Rocque, S., Baldet, T., Gerbier, G., Barragué, B., Biteau-Coroller, F., Roger, F., Viel, J.-F. and Mauny, F. (2007) Use of high spatial resolution satellite imagery to characterize landscapes at risk for bluetongue. Veterinary Research, vol. 38, n°5, p. 669-683.

Jenson, S. K. and Domingue, J. O. (1988) Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 54, n° 11, p. 1593-1600.

Mathieu, B., Biteau-Coroller, F. and Baldet, T. (2004) Prospections entomologiques dans la région de Roquebrune sur Argens suite à la découverte de spécimens de *Culicoides imicola* vecteur de la fièvre catarrhale du mouton. Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement, Rapport de mission, Montpellier, 12 p.

Meiswinkel, R., Labuschagne, K., Baylis, M., and Mellor, P. S. (2004). Multiple vectors and their differing ecologies: observations on two bluetongue and African horse sickness vector *Culicoides* spcies in South Africa. Veterinaria Italiana, vol. 40, n° 3, p. 296-302.

Mellor, P.S., Boorman, J. and Baylis, M. (2000) *Culicoides* biting midges: Their role as arbovirus vectors. Annual Review of Entomology, vol. 45, p. 307-340.

Munga, S., Minakawa, N., Zhou, G.F., Mushinzimana, E., Barrack, O.O.J., Githeko, A.K. and Yan, G.Y. (2006) Association between land cover and habitat productivity of malaria vectors in western Kenyan highlands. American Journal of Tropical Medicine and Hygiene, vol. 74, n° 1, p. 69-75.

Office international des épizooties (2007) Maladies de la Liste de l'OIE. http://www.oie.int/fr/maladies/fr_classification.htm?e1d7.

Purse, B.V., Mellor, P.S., Rogers, D.J., Samuel, A.R., Mertens, P.P.C. and Baylis, M. (2005) Climate change and the recent emergence of bluetongue in Europe. Nature Reviews Microbiology, vol. 3, n° 2, p. 171-181.

Raffy, M. and Tran, A. (2005) On the dynamics of flying insects populations controlled by large scale information. Theoretical Population Biology, vol. 68, n° 2, p. 91-104.

Roger, F. (2002) Emergence of Bluetongue Disease in the Mediterranean basin: Modelling Locations at Risk for Potential Vectors (*Culicoides spp.*) using Satellite Imagery. Master thesis, University of London, 84 p.

Rogers, D.J. and Randolph, S.E. (2006) Climate change and vector-borne diseases. Advances in Parasitology, vol. 62, p. 345-381.

Sarto i Monteys, V., Ventura, D., Pagès, N., Aranda, C. and Escosa, R. (2005) Expansion of *Culicoides imicola*, the main bluetongue virus vector in Europe, into Catalonia, Spain. The Veterinary Record, vol. 156, n° 13, p. 415-417.

Sellers, R.F. (1980) Weather, host and vector--their interplay in the spread of insect-borne animal virus diseases. Journal of Hygiene (Cambridge), vol. 85, n° 1, p. 65-102.

Sellers, R.F. and Mellor, P.S. (1993) Temperature and the persistence of viruses in *Culicoides spp.* during adverse conditions. Revue scientifique et technique de l'Office International des Epizooties, vol. 12, n° 3, p. 733-55.

Tatem, A.J., Baylis, M., Mellor, P.S., Purse, B.V., Capela, R., Pena, I. and Rogers, D.J. (2003) Prediction of bluetongue vector distribution in Europe and north Africa using satellite imagery. Veterinary Microbiology, vol. 97, n° 1-2, p. 13-29.

Toma, B. and Thiry, E. (2003) Qu'est-ce qu'une maladie émergente ? Épidémiologie et santé animale, vol. 44, p. 1-11.

Tran, A., Biteau-Coroller, F., Guis, H. and Roger, F. (2005) Modélisation des maladies vectorielles. Epidémiologie et santé animale, Bulletin de l'Association pour l'Étude de l'Épidémiologie des Maladies Animales, vol. 47, p. 35-51.

Vanwambeke, S.O., Somboon, P., Harbach, R.E., Isenstadt, M., Lambin, E.F., Walton, C. and Butlin, R.K. (2007) Landscape and land cover factors influence the presence of *Aedes* and *Anopheles* larvae. Journal of Medical Entomology, vol. 44, n° 1, p. 133-144.

Wittman, E.J., Mellor, P.S. and Baylis, M. (2001) Using climate data to map the potential distribution of *Culicoides imicola* (Diptera : Ceratopogonidae) in Europe. Revue Scientifique et Technique de l'Office International des Épizooties, vol. 20, n° 3, p. 731-740.