
Les nuées dynamiques floues appliquées au développement d'une typologie paysagère.

Caractérisation d'un risque de santé publique.

Florian Tolle¹, François Pierre Tourneux¹

¹ *ThéMA UMR 6049 CNRS - Université de Franche-Comté, 32 rue Mégevand, 25030 Besançon cedex.*

florian.tolle@univ-fcomte.fr; francois.tourneux@univ-fcomte.fr

*RÉSUMÉ. Un programme d'épidémiosurveillance actuellement en cours vise à évaluer la présence du parasite *Echinococcus multilocularis* en France. Contrairement aux hypothèses écologiques initiales, le parasite et ses hôtes ne semblent pas privilégier certains modes d'occupation du sol plus que d'autres. L'objectif de ce travail consiste à identifier dans un premier temps les contextes paysagers au sein desquels la présence parasitaire est confirmée puis, dans un second temps, à mettre en évidence un gradient dans les prévalences spécifiques à chacun de ces contextes. Les nuées dynamiques floues ont permis d'optimiser et de critiquer la typologie paysagère établie. La hiérarchisation de cette typologie en fonction des prévalences constatées sur le terrain a permis de donner un éclairage nouveau sur le risque de présence du parasite et sur les facteurs favorisant sa présence.*

*ABSTRACT. A monitoring survey is under way in France to identify the presence of the parasite *Echinococcus multilocularis*. In opposition to initial ecological hypothesis, the parasite and its animal hosts do not seem to favour specific land use modes. This research consists in identifying landscape contexts in which the parasite's presence is confirmed. It then aims at highlighting a potential gradient in the prevalences in each specific context. Fuzzy k-means have been used to optimize and to discuss the landscape typology. The mapping of the typology according to the level of prevalence gives an insight on the risk associated with the presence of the parasite and on the landscape factors favourable to its presence.*

*MOTS-CLÉS : Typologie paysagère, approche multiscalaire, nuées dynamiques floues, santé publique, *Echinococcus multilocularis*.*

*KEYWORDS: Landscape typology, multiscale analysis, fuzzy k-means, public health, *Echinococcus multilocularis*.*

1. Introduction

La dispersion du parasite responsable de l'échinococcose alvéolaire, maladie grave contractée par l'homme suite à l'ingestion d'œufs d'*Echinococcus multilocularis*, fait l'objet en France d'un programme de veille sanitaire. L'influence du paysage sur les dynamiques de population des hôtes intermédiaires du parasite, essentiellement des campagnols, a fait l'objet de travaux approfondis (Delattre *et al.*, 1992 ; Delattre *et al.*, 1999 ; Duhamel *et al.*, 2000). Des recherches effectuées sur les dynamiques des hôtes du parasite en Franche-Comté ont établi un lien entre le taux de prairie dans l'environnement et l'infestation des renards, hôtes définitifs du parasite (Giraudoux *et al.*, 1997 ; Giraudoux, 1991). Raoul (2001) insiste sur le fait que « le paysage, en tant que facteur d'organisation de la structure et de la dynamique des communautés, est un facteur central et déterminant dans les mécanismes de transmission ». Des échantillons de fèces de renards ont été ramassés dans 41 départements du nord et de l'est de la France. Ces échantillons, précisément géoréférencés, ont été analysés en laboratoire de manière à identifier le parasite. Ce programme est le fruit d'une collaboration entre l'Université de Franche-Comté, l'Entente interdépartementale de lutte contre la Rage et autres Zoonoses (ERZ) et l'Agence Française de Sécurité Sanitaire des Aliments (AFSSA).

La base de données française couvre des régions aux caractéristiques paysagères très hétérogènes. Les hypothèses écologiques émises sur le fonctionnement du cycle parasitaire indiquent une corrélation présumée entre l'occupation des sols et l'intensité de la présence parasitaire dans l'environnement. La répartition des échantillons positifs sur la zone d'étude ne laisse pas apparaître de foyers clairement définis. Nous avons donc cherché à caractériser les contextes paysagers au sein desquels le parasite a été identifié.

2. Matériel et méthodes

Sur 2813 échantillons récoltés, 82 se sont avérés porteurs du parasite. La base de données Corine Land Cover était la seule source de données d'occupation du sol disponible et a été utilisée comme base d'analyse. En écologie du paysage, la composition paysagère (part relative, en superficie, de chaque type d'occupation du sol) constitue un moyen de description simple. La nature de l'occupation des sols dans l'environnement des points de données peut être considérée comme un indicateur de premier ordre des phénomènes écologiques qui s'y déroulent. Afin de repérer les classes paysagères les plus significatives dans l'environnement des données ponctuelles collectées, nous avons effectué une classification ascendante hiérarchique (CAH) sur les postes d'occupation du sol calculés dans un rayon de 5 kilomètres. Ce rayon d'analyse a volontairement été choisi relativement grand de sorte que les tendances générales se dégagent. Toutes les classes d'occupation du sol ayant un maximum différent de 0 ont été entrées dans l'analyse. L'arbre

hiérarchique obtenu offre une structure très déséquilibrée avec un agglomérat indistinct et des classes monovariées. Quatre variables se rangent d'une façon nette et sont retenues pour la typologie : les cultures, les forêts, les prairies et les zones mixtes. L'observation précise des données nous a conduit à retenir la classe correspondant aux prairies naturelles. Cette classe caractérise en effet un contexte paysager spécifique rencontré en altitude. Les cinq variables ainsi présumées pertinentes ont fait l'objet d'une analyse en composantes principales (ACP). L'objectif de cette étape est d'identifier d'éventuelles corrélations entre ces variables qui pourraient en rendre certaines superflues. La dispersion des cinq variables dans le plan des deux premiers axes factoriels issus de l'ACP semble confirmer leur intérêt propre. Les variables paysagères ainsi retenues ont servi de base à l'établissement d'une typologie visant à obtenir une répartition des échantillons positifs selon des critères paysagers raisonnés et quantifiables.

La question de l'échelle d'analyse du paysage des échantillons s'est posée. Nous avons cherché une méthode d'estimation d'une échelle optimale d'analyse. De manière plus générale, c'est la totalité des échantillons récoltés, représentatifs des divers contextes propices à l'établissement de renards, que nous avons cherché à relier à des types paysagers clairement définis.

Les nuées dynamiques floues, ou *fuzzy k-means*, offrent plusieurs avantages que nous avons mis à profit. Contrairement aux nuées dynamiques classiques, qui affectent chaque individu de l'échantillon à une seule classe, les *fuzzy k-means* autorisent une classification partielle des individus dans plusieurs classes. Cette propriété permet de prendre en compte les zones de transition entre classes où les individus sont susceptibles d'appartenir à plus d'une classe. Dans le cas d'une classification partielle d'un individu, un vecteur de classification renseigne sur la proximité de l'individu aux différentes classes existantes. La somme de ces coefficients est toujours égale à 1. Formellement, la fonction liée aux *fuzzy k-means* se note comme suit (Bezdek, 1981) :

$$J(M,C) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k m_{ij}^{\phi} d_{ij}^2$$

fonction répartissant un jeu de données $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ en k classes avec :

$$\sum_{j=1}^k m_{ij} = 1 \quad i = 1, 2, \dots, n$$

$$\sum_{i=1}^n m_{ij} > 0 \quad j = 1, 2, \dots, k$$

$$m_{ij} \in \{0, 1\}$$

et avec ϕ correspondant au paramètre de flou qui détermine le degré de flou (fuzziness) de la classification ; et d correspondant à la métrique appliquée aux

variables. La fonction J regroupe la matrice de classification M et les centroïdes C des classes.

Un des atouts des *fuzzy k-means* réside dans les possibilités d'évaluation des performances des modèles. Ainsi, Roubens (1982) définit deux indicateurs visant à déterminer le nombre de classes optimal pour un jeu de données. Tout d'abord, l'indice de performance de la classification floue (Fuzziness Performance Index ou FPI) mesure le degré de recouvrement des classes. Les valeurs du FPI s'échelonnent entre 0 et 1. Une valeur proche de 1 indique un niveau élevé de recouvrement des classes, alors qu'une valeur proche de 0 est le reflet d'une classification plus nette. Le FPI se note comme suit :

$$FPI = 1 - \frac{kF - 1}{k - 1}$$

avec F comme coefficient de partition :

$$F = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k m_{ij}^2$$

et k comme nombre de classes.

L'indice modifié d'entropie de la partition (Modified Partition Entropy ou MPE) fournit une estimation du ratio de désorganisation associé à un nombre de classes spécifié. Les valeurs du MPE sont également comprises entre 0 et 1. Des valeurs proches de 0 indiquent une bonne organisation au sein des classes, alors qu'une valeur proche de 1 est associée à une forte désorganisation. Le MPE se formule comme suit :

$$MPE = \frac{H}{\log k}$$

avec H pour l'entropie :

$$H = -\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k m_{ij} \times \log(m_{ij})$$

En pratique, le calcul des indices FPI et MPE, pour une partition d'un même jeu de données en un certain nombre de classes, permet d'identifier le nombre de classes offrant un compromis optimal de séparation des individus en classes clairement identifiées et nettement différentes. Cela s'effectue en cherchant le minimum commun aux deux indices donnant une lecture du nombre de classes qui partagent au mieux l'échantillon. Les indices FPI et MPE offrent aussi la possibilité de comparer la qualité de la classification établie pour des jeux de données décrits par les mêmes variables, ou encore, comme nous l'avons expérimenté, de comparer la qualité de classement pour des valeurs de variables distinctes et, plus spécifiquement, à des rayons d'échelle différents dans notre cas.

Les variables paysagères retenues pour effectuer la classification ont donc été calculées dans l'environnement des points à des rayons croissants de 3000 à

10 000 mètres, avec un pas de 1000 mètres. Dans l'optique d'une classification offrant une description globale du paysage des échantillons, les rayons inférieurs à 3000 mètres n'ont pas été retenus. Le logiciel Fuzme (pour Fuzzy means ; Minasny et McBratney, 2002) a été utilisé pour classer les échantillons. La classification s'est effectuée sur la distance de Mahalanobis associée aux variables. Cette métrique offre l'avantage de prendre en compte la variété des distributions des variables. La métrique de Mahalanobis consiste à transformer les variables de sorte que leur moyenne soit de 0 et leur variance de 1 (McBratney et Moore, 1985).

3. Résultats

Pour chaque rayon, les partitions allant de 2 à 10 classes ont été testées et les valeurs de FPI et de MPE enregistrées. La figure 1 illustre les résultats du FPI. Les courbes associées aux rayons supérieurs à 6000 mètres ne sont pas représentées ici pour des raisons de lisibilité et parce qu'elles sont apparues systématiquement moins performantes que les autres. De manière similaire, le MPE a été calculé (figure 2).

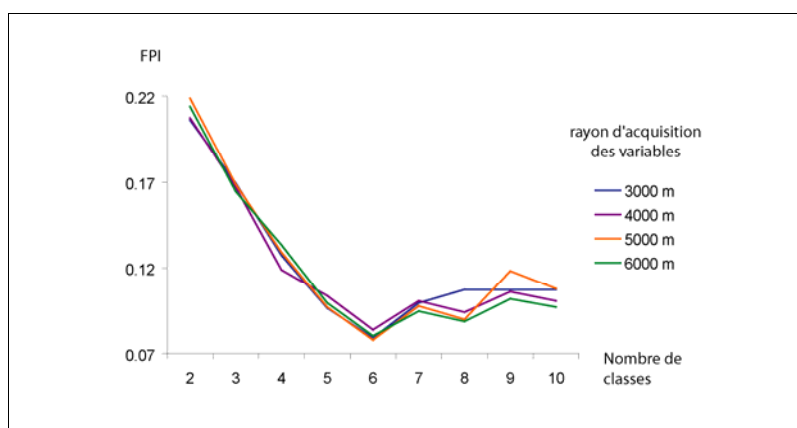


Figure 1. Indice de performance de la classification floue (FPI) pour quatre rayons d'analyse distincts

En abscisse figure le nombre de classes testées, en ordonnées les résultats de FPI et de MPE (le plus faible étant le meilleur), et les courbes indiquent les valeurs atteintes pour différents rayons de voisinage testés. L'analyse de l'évolution de ces deux indices en fonction du nombre de classes révèle clairement une partition optimale en 6 classes. Il est également notable que les variations dans les valeurs de FPI et de MPE ne sont pas très importantes, ce qui tend à indiquer une grande stabilité de classification. Une observation précise de la partition en 6 classes

semble indiquer une qualité de classement légèrement supérieure pour le rayon de 5000 mètres. Ce rayon pourra donc être retenu pour effectuer la partition.

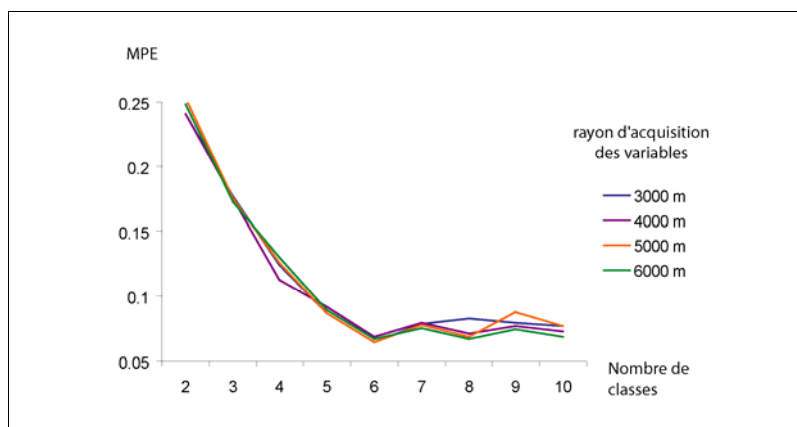


Figure 2. Indice modifié d'entropie de la partition (MPE) pour quatre rayons d'analyse distincts

L'application de l'algorithme des nuées dynamiques floues aux données françaises (positives et négatives) a conduit à l'établissement de 6 types paysagers ayant des caractéristiques propres et définis par les centres de classes issus du calcul. La répartition des échantillons dans ces 6 classes permet de retrouver certains ensembles comme le Bassin Parisien ou les zones prairiales et forestières de l'Est. Ce type de représentation n'offre cependant pas une lecture facile. Le continuum spatial n'est pas restitué et l'imbrication graphique des points ne permet pas de faire ressortir des ensembles clairs. Ces difficultés seront levées par une généralisation spatiale de la classification.

À l'échelle retenue pour l'établissement de la typologie paysagère des échantillons, c'est la classe d'occupation du sol dominante qui définit le plus clairement chaque type. Cette classe représente l'élément dominant dans le paysage et donc, au sens de l'écologie du paysage, la matrice des types constitués. Trois types sont définis par une matrice bien caractérisée. Ils sont respectivement dominés par les cultures, les prairies et la forêt. Les trois autres types sont plus complexes à définir. Le type marqué par le poste « agricole mixte » n'offre pas d'élément paysager clairement dominant mais comporte cependant une majorité relative d'espaces complexes et hétérogènes. La définition même de la classe mixte dans Corine Land Cover tend à appuyer ce constat. Le type marqué par les prairies naturelles correspond plus précisément aux prairies d'altitude des zones montagneuses, notamment dans les Alpes. Là encore, la classe d'occupation du sol distinctive de ce type, qualifié d'alpin, ne s'impose pas totalement dans le paysage

puisqu'elle se combine avec d'autres classes. Le type alpin caractérise un contexte bien identifié et clairement défini par la typologie. Le dernier type est qualifié de composite. Il a pour particularité de ne pas avoir de dominance marquée et de présenter une proportion notable de classes marginales. Ce type correspond de fait aux échantillons ne rentrant dans aucune des catégories définies précédemment. Concrètement, les échantillons appartenant à ce type sont situés dans des contextes paysagers où une classe rare par ailleurs est ponctuellement présente en proportions importantes. Cela peut être le cas de paysages de vignes par exemple. Cela peut aussi être dû à la présence d'une proportion importante de zones urbaines ou artificialisées dans l'environnement du point.

Type	Effectif	Nb de positifs	Prévalence	IC 95 % inf	IC 95 % sup
Prairial	475	12	2.52 %	1.11	3.94
Mixte	588	17	2.89 %	1.53	4.25
Cultivé	793	26	3.28 %	2.03	4.52
Forêt	769	22	2.86 %	1.68	4.04
Alpin	95	2	2.10 %	0	5.04
Composite	93	3	3.22 %	0	6.88

Tableau 1. Répartition des échantillons, prévalence et intervalle de confiance (IC) de la prévalence des échantillons positifs dans les six classes de la typologie

Le tableau 1 montre la répartition des échantillons dans les types constitués. Un premier constat est que les positifs s'inscrivent dans tous les types paysagers. Les différences nettes existant entre les types ne semblent pas affecter la répartition géographique du parasite. Contrairement à ce qui était attendu sur la base des hypothèses écologiques formulées, les prévalences relatives calculées sur chaque type ne font pas apparaître de discrimination significative. De manière surprenante, c'est même le type cultivé qui présente la prévalence la plus élevée. On constate, en outre, que les prévalences restent relativement modérées pour tous les types.

Pour obtenir une vision globale de la répartition des paysages des points d'échantillonnage, nous avons mis en place un modèle matriciel, à la maille de deux kilomètres, qui couvre la totalité de la zone d'étude. Pour chacune des cellules de cette grille, les variables de composition paysagère ont été calculées. Les centres des classes, issus de la classification effectuée à l'étape précédente, ont ensuite servi de référence pour l'affectation des cellules aux types paysagers existants. Ainsi, chaque point de l'espace est affecté à un type paysager en fonction de l'occupation du sol qui le caractérise. La conversion en un raster à deux kilomètres de résolution nous a permis d'obtenir une représentation continue des paysages de la zone d'étude. Il nous a ensuite semblé intéressant d'élargir à l'ensemble du territoire français la typologie élaborée dans le but d'obtenir une représentation des potentiels paysagers (figure 3). Cette démarche est discutable dans le sens où elle extrapole à la totalité

de la France des types définis uniquement sur un tiers nord du pays. La variabilité spatiale des communautés de campagnols et des densités de renards n'est donc pas prise en compte ici. En revanche, les principaux traits du paysage français ressortent clairement de cette carte. Par exemple, la forêt des Landes se reconnaît aisément par sa forme triangulaire dans le sud-ouest. Au nord, les grandes zones d'agriculture intensive du Bassin Parisien apparaissent nettement. Les zones prairiales de Normandie et du Massif Central ressortent également. De même, l'urbanisation littorale bretonne, la singularité du couloir rhodanien ou la coupure discontinue du val de Loire sont bien mis en évidence.

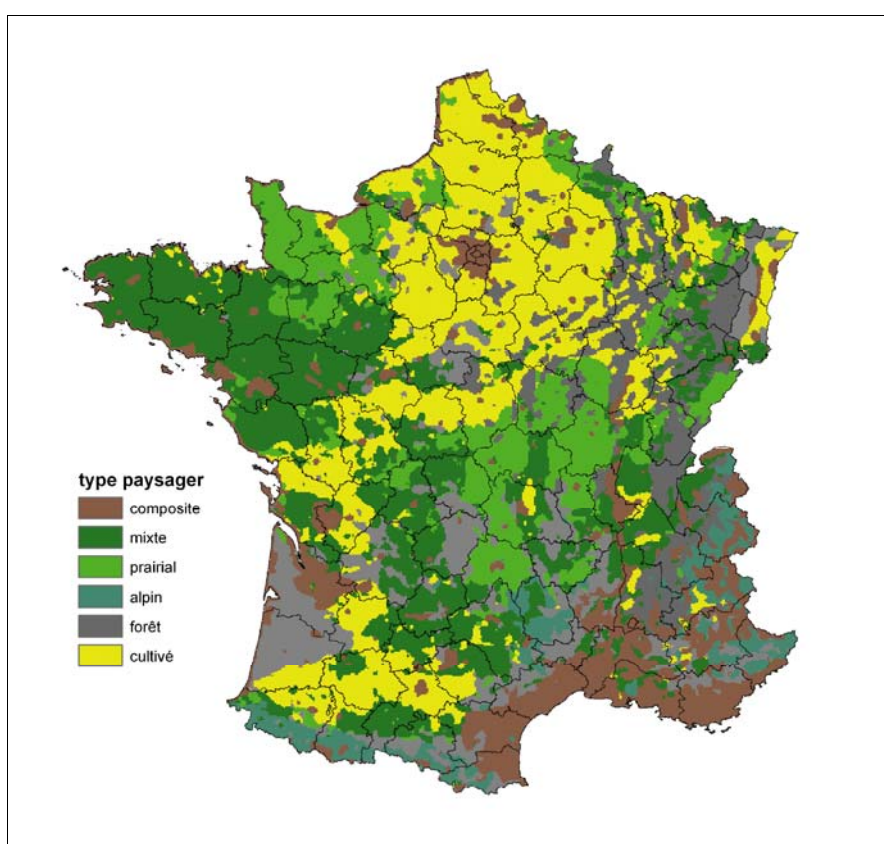


Figure 3. Typologie paysagère étendue à la France

La qualité de classement des pixels de la carte peut être représentée visuellement grâce à l'indice de confusion assigné par les nuées dynamiques floues à chaque point de la grille utilisée (figure 4). L'indice de confusion correspond au ratio de la classe d'allocation dominante sur la classe d'allocation secondaire. Un indice de

confusion fort indique une mauvaise capacité de classification du pixel dans un seul type. Ce sont principalement les zones de transition entre types paysagers qui apparaissent ici comme difficilement classées. Ces zones correspondent aux limites existant dans les paysages. On retrouve par exemple les rebords du vignoble alsacien ou le contour de l'agglomération d'Amiens. Globalement, les valeurs d'indice de confusion sont plutôt satisfaisantes à l'exception de quelques zones moins bien définies comme le Pays de Caux, au nord de Rouen, ou le Boulonnais.

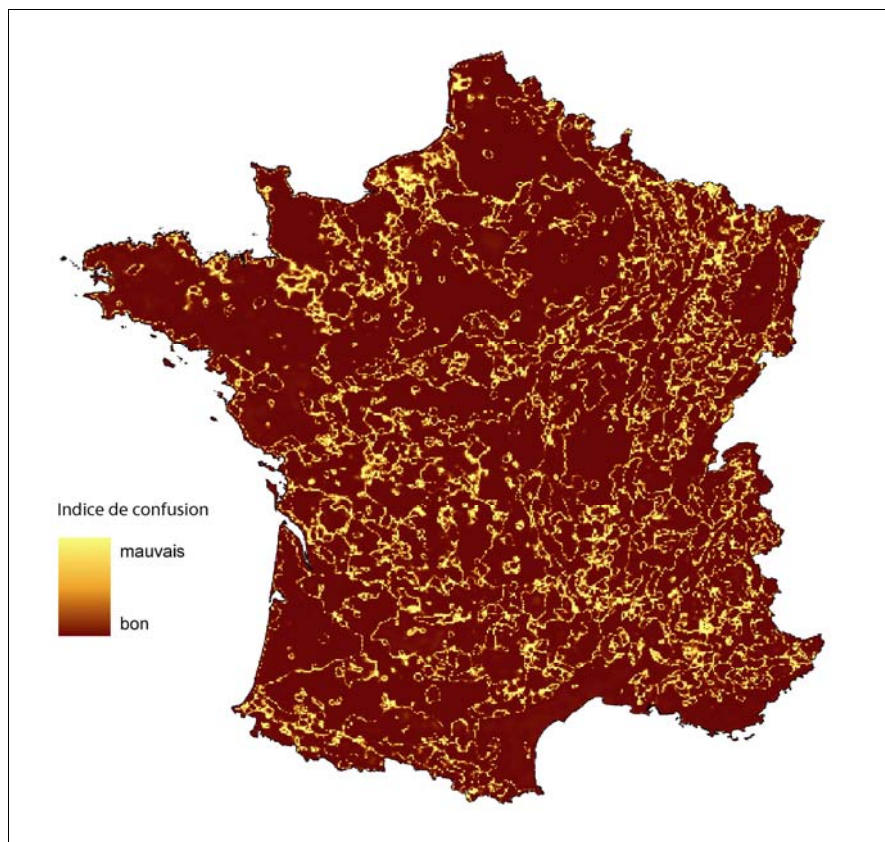


Figure 4. *Indice de confusion de la classification floue*

La répartition des échantillons positifs dans les différents types déterminés à une échelle de 5000 mètres ne nous a pas permis de confirmer l'hypothèse de répartition privilégiée du parasite en fonction du paysage. Ceci peut s'expliquer par une réelle homogénéité de la répartition du parasite dans la zone d'étude. Mais cela peut aussi être lié à l'échelle à laquelle les types paysagers ont été décrits. Si le premier niveau de typologie établi précédemment nous apporte une description de la matrice

paysagère dans laquelle les échantillons ont été récoltés, il est possible que les éléments paysagers liés à la répartition du parasite dans l'environnement interviennent à des niveaux d'échelle plus fins. Nous avons donc procédé à l'établissement d'un deuxième niveau de typologie pour quatre des types de premier niveau : le type cultivé, le type prairial, le type forêt et le type mixte. Pour chaque type, nous créons des sous-types, identifiés en suivant un protocole similaire à celui utilisé au premier niveau. Le second niveau d'échelle a été spécifié indépendamment pour chaque type en fonction des valeurs de FPI et de MPE systématiquement recalculées pour déterminer, à chaque étape, le nombre de classes et le rayon de recherche optimums. Ces indices ont été calculés à des rayons allant de 1000 à 4500 mètres et par pas de 500 mètres. Les résultats ont mis en évidence des seconds niveaux d'analyse variant entre 2000 et 3000 mètres de rayon. Les valeurs de FPI et de MPE ont également servi à l'identification du nombre de sous-types optimal qui s'est avéré être de cinq dans chaque cas.

L'introduction d'un deuxième niveau de typologie aboutit à la description des paysages en fonction (i) de leur contexte général (premier niveau) et (ii) de leurs spécificités locales (second niveau). Là encore, on constate une répartition des échantillons positifs sur tous les sous-types sans exception. Cela semble confirmer la capacité d'adaptation du parasite et de ses hôtes. Dans tous les contextes présents dans la zone d'étude, *Echinococcus multilocularis* a été identifié. Ce constat est important du point de vue écologique car il met en évidence la pluralité des contextes paysagers propices à la transmission du parasite. Sur le plan épidémiologique, ces résultats indiquent que le cycle peut-être fonctionnel dans des espaces où il n'était pas attendu a priori. Ainsi, le sous-type cultivé dominant, présumé pauvre en habitat pour les campagnols, regroupe 8 des 82 échantillons positifs récoltés, ce qui en fait le contexte paysager où le maximum d'échantillons positifs ont été ramassés. La prévalence calculée pour chaque sous-type varie de 1,1 % à 6,66 %. Un gradient apparaît plus nettement dans les paysages et dans leur propension à accueillir le parasite et ses hôtes. Ces éléments offrent l'opportunité de hiérarchiser, de spatialiser puis de représenter par la carte la relation entre paysage et parasite. Le second niveau de typologie a été spatialisé et étendu à l'ensemble français selon un protocole similaire à celui du premier niveau. Les cellules ont été attribuées à chaque sous-type dans la limite d'extension définie au premier niveau de la typologie. Nous avons classé les sous-types paysagers par ordre croissant en fonction de leur prévalence.

Ce classement ne permet pas d'identifier une tendance claire dans la hiérarchie des sous-types paysagers. On constate cependant que les trois sous-types aux prévalences les plus fortes correspondent à des sous-types composites. Ces sous-types se caractérisent par une proportion notable de classes d'occupation du sol différentes de celles incluses dans l'établissement de la typologie. Nous nous sommes donc intéressés aux spécificités propres à ces sous-types composites. Dans le cas des deux sous-types présentant la plus forte prévalence, on constate une proportion relativement importante de tissu urbain discontinu (6,85 % pour le sous-

type mixte composite et 7,09 % pour le sous-type cultivé composite). Plus globalement, la proportion des territoires artificialisés s'élève respectivement à 9,72 % et 9,98 %. On peut qualifier d'hétérogènes les paysages associés à ces sous-types. Ils correspondent à des renards fréquentant des espaces aux ressources variées et vivant à proximité des habitations. Le sous-type forêt composite présente une plus faible proportion de territoires artificialisés. En revanche, il présente des pourcentages élevés de classes d'occupation du sol rarement rencontrées par ailleurs tels que les landes et broussailles. Le point commun entre les trois cas que nous venons d'évoquer pourrait être le caractère non-agricole d'une proportion du paysage. Cela pourrait impliquer d'une part une diversité de ressources favorables à de fortes densités de renard et, d'autre part, la présence d'habitats favorables aux campagnols (jardins, friches...). La conjonction de ces facteurs pourrait être à l'origine d'une plus grande fonctionnalité du cycle parasitaire dans ce genre de paysage. De manière générale, les sous-types présentés ne s'ordonnent pas préférentiellement en fonction de leur type d'origine, pas plus qu'ils ne le font en fonction de la variable paysagère caractérisant leur sous-type. La représentation de cette hiérarchie des sous-types paysagers sur la totalité de l'espace français nous offre une vision globale des paysages présumés à risque (figure 5).

La figure 5 appelle plusieurs commentaires. Tout d'abord, aucun foyer clairement délimité ne se dessine sur cette carte. Seules la péninsule bretonne et la basse Loire peuvent éventuellement être mentionnées. Ces zones n'ont pas été échantillonnées sur le terrain et on ne peut donc pas affirmer qu'elles sont un foyer de haute endémie. Elles sont, en revanche, un foyer potentiel qui pourrait être révélé par une enquête appropriée et/ou une extension de la zone d'endémie. Sur le reste de l'espace, on remarque des transitions brusques entre des paysages présumés favorables et des paysages qui le sont moins. Ceux-ci sont fréquemment contigus et les changements de contexte sont marqués. La prévalence potentielle sera peut-être moyenne à l'échelle régionale, mais des petits foyers locaux sont bien identifiés en prévalence potentielle maximale. Rappelons toutefois ici que des échantillons positifs ont été confirmés dans chacun de ces sous-types paysagers, et donc que même les paysages représentés en vert sont susceptibles d'accueillir le cycle parasitaire. Les zones signalées comme présumées à risques sont régulièrement rencontrées aux abords des zones composites. Les marges des grandes agglomérations sont ainsi partiellement mises en avant. A l'inverse, la forêt massive, ou en association simple avec un type agricole, semble constituer le seul facteur d'abaissement des prévalences (Vosges, Landes, Corrèze).

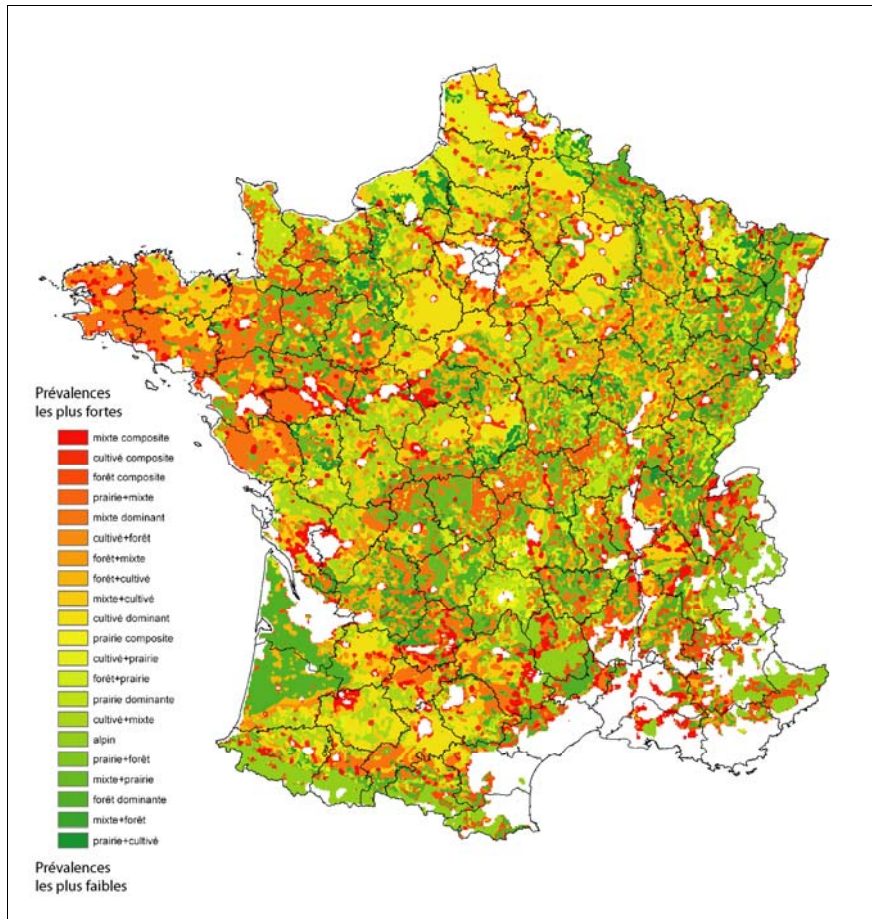


Figure 5. *Sous-types paysagers et présence parasitaire présumée à l'échelle de la France*

4. Discussion

Les échantillons positifs sont répartis sur la totalité du territoire échantillonné. La prévalence estimée sur la totalité de cette zone est de 2,9 % (intervalle de confiance à 95 % de la moyenne : 2,3-3,5). La présence du parasite est ainsi confirmée sur toute la zone d'étude, y compris dans des régions où sa présence n'avait jamais été attestée. Sur l'ensemble français, les limites d'extension du parasite ne semblent pas atteintes à l'heure actuelle, et c'est la poursuite du programme d'échantillonnage qui permettra éventuellement de la déterminer. Les

nouvelles régions où le parasite a été trouvé peuvent être considérées comme susceptibles de permettre la survie de ses hôtes en nombre suffisant pour le maintien du cycle, et notamment pour la survie des œufs dans l'environnement.

Il est difficile d'évaluer si cette nouvelle situation épidémiologique peut-être imputée à une réelle extension de la zoonose en France, ou si c'est le fait d'avoir cherché spécifiquement et de manière systématique le parasite qui a conduit à mettre en lumière une situation préexistante. Le faible nombre de cas humains recensés dans les zones nouvellement identifiées, ainsi que le manque d'information sur la maladie, peuvent avoir entraîné la non-détection du parasite alors qu'il était déjà présent. Faute de données de référence, il est impossible d'évaluer l'évolution temporelle de la présence du parasite et d'attester son émergence potentielle en France. Toutefois, la répartition homogène des échantillons sur toute la zone, qui couvre des foyers d'endémie connus, incite à poser la question de la prévalence précise dans ces zones, ainsi que la question de la détection des cas humains qui pourraient être nettement plus nombreux que le nombre actuellement recensé.

La grande diversité des paysages au sein desquels le parasite a été identifié peut être interprétée à différents niveaux. Tout d'abord, cela peut signifier que les conditions favorables aux interactions entre hôtes du parasite sont plus largement répandues que ne le laisse prévoir notre hypothèse de départ. En effet, les premiers résultats présentés ici indiquent que les populations de renards et de campagnols sont présentes en nombre suffisant sur toute la zone échantillonnée, et dans tous les contextes identifiés. La réalisation du cycle parasitaire serait donc nettement moins contrainte par les densités d'hôtes qu'il n'était présumé jusqu'à présent. Notamment, la densité d'hôtes intermédiaires ne semble pas jouer un rôle crucial dans la persistance du cycle. Cela ne remet pas en cause l'hypothèse selon laquelle de fortes densités de campagnols entraînent de fortes prévalences vulpines, mais cela illustre le fait que le parasite peut établir son cycle dans des contextes très différents, et même dans ceux supposés peu favorables. L'hypothèse d'un cycle fonctionnant localement sur de petites communautés de campagnols, concentrées dans des habitats de petites superficies, peut ainsi être formulée. Dans ce cas précis, le problème lié à la source de description de l'occupation du sol peut s'avérer aigu. En effet, la taille minimale des unités paysagères décrites dans Corine Land Cover peut tout à fait conduire à ignorer ces zones restreintes où le cycle est susceptible de s'établir. Typiquement, les lisières de champs ou les espaces verts ne seront pas représentés dans Corine Land Cover. De même, certaines cultures comme la luzerne sont favorables à certains campagnols, comme le Campagnol terrestre, mais sont classées sans distinction en tant que cultures dans Corine Land Cover. Toutefois, Corine Land Cover offre un outil de caractérisation du contexte de vie des hôtes qui semble ici confirmer la multiplicité des scénarios favorables à l'établissement conjoint de populations d'hôtes intermédiaires et définitifs.

5. Conclusion

L'approche exposée ici offre un aperçu de la répartition des œufs d'*Echinococcus multilocularis* dans les paysages. Cette approche s'est construite progressivement à partir des données disponibles et offre l'avantage de ne pas être figée. Il est possible d'intégrer de nouveaux échantillons dans la typologie. Maintenant que les paysages ont été caractérisés précisément pour la plus grande partie du territoire français, les nouvelles données viendront s'inscrire dans les sous-types correspondants à l'espace où elles ont été collectées. Elles alimenteront ainsi les statistiques de prévalence et permettront de confirmer, d'affiner ou de modifier la hiérarchie identifiée actuellement. L'identification du parasite à plusieurs reprises dans un sous-type paysager précis conduirait à une augmentation de la prévalence relative de ce contexte, et donc à sa prise en considération plus nette dans la typologie et la représentation du risque de présence parasitaire. L'étendue couverte par la campagne d'échantillonnage française et la nature des données d'occupation du sol à notre disposition nous ont conduit à n'aborder les contextes paysagers à l'échelle de la France qu'à partir de la composition des paysages. Pourtant, il est probable que la configuration des paysages entre également en compte. Pour intégrer cette dimension, il semble cependant nécessaire de disposer d'autres données spatiales, couvrant les espaces d'intérêt à une échelle plus fine. Cette phase pourrait se concentrer sur certaines régions qui offrent des situations épidémiologiques jusque là insoupçonnées. Le cas des échantillons positifs récoltés en Seine-et-Marne pourrait faire l'objet d'une étude spécifique. Celle-ci pourrait se doubler d'une prospection sur le terrain visant à préciser les habitats d'hôtes intermédiaires sur la zone concernée, ainsi que les modes d'utilisation de l'espace par les renards.

Les auteurs tiennent à remercier Patrick Giraudoux et Francis Raoul du laboratoire de Biologie environnementale. Benoit Combes, Déborah Gottscheck, Stéphanie Favier et Frantz Catarelli de l'ERZ (Entente interdépartementale de lutte contre la Rage et autres Zoonoses). Denis Augot et Franck Boué de l'AFSSA (Agence Française de Sécurité Sanitaire des Aliments). Projet soutenu par le contrat Européen "Eurechinorisk" QLK-2-CT-2001-01995 "Risk assessment and prevention of Alveolar Echinococcosis".

6. Bibliographie

- Bezdek J.C., *Pattern recognition with fuzzy objective function algorithms*, New York, Plenum Press, 1981.
- Delattre P., Giraudoux P., Baudry J., Musard P., Toussaint M., Truchetet D., Stahl P., Poule M.L., Artois M., Damange J.P., et Quéré J.P., "Land use patterns and types of common

vole (*Microtus arvalis*) population kinetics”, *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 39, 1992, p. 153-169.

Delattre P., De Sousa B., Fichet-Calvet E., Quéré J.-P. et Giraudoux P., “Vole outbreaks in a landscape context: evidence from a six year study of *Microtus arvalis*”, *Landscape ecology*, 14, 1999, p. 401-412.

Duhamel R., Quéré J.-P., Delattre P. et Giraudoux P., “Landscape effects on the population dynamics of the fossorial form of the water vole (*Arvicola terrestris sherman*)”, *Landscape ecology*, 15, 2000, p. 89-98.

Giraudoux P., Utilisation de l’espace par les hôtes du ténia multiloculaire (*Echinococcus multilocularis*) : conséquences épidémiologiques, Thèse de Doctorat, Université de Bourgogne, 1991, 106 p.

Giraudoux P., Delattre P., Habert M., Quéré J.P., Deblay S., Defaut R., Duhamel R., Moissenet M.F., Salvi D. et Truchetet D., “Population dynamics of fossorial water vole (*Arvicola terrestris scherman*): a land usage and landscape perspective”, *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 66, 1997, p. 47-60.

MacBratney A.B. and Moore A.W., “Application of fuzzy sets to climatic classification”, *Agricultural and forest meteorology*, 35, 1985, p. 165-185.

Minasny B., McBratney A.B., FuzME version 3.0, Australian Centre for Precision Agriculture, The University of Sydney, Australie, <http://www.usyd.edu.au/su/agric/acpa>, 2002.

Raoul F., Ecologie de la transmission d’*Echinococcus multilocularis* chez le renard dans l’Est de la France : dépendance au paysage et relation proie-prédateur, Thèse de doctorat, Université de Franche-Comté, 2001, 164 p.

Roubens M., “Fuzzy clustering algorithms and their cluster validity”, *European journal of operational research*, 10, 1982, p. 841-847.

Florian Tolle est docteur en géographie. Il est actuellement en post-doctorat CNRS au laboratoire de Chrono-Ecologie de l’Université de Franche-Comté. Ses travaux portent sur des problématiques d’épidémiologie spatiale et de contextes paysagers multiscalaires abordés par les outils et les méthodes de l’analyse spatiale et de l’écologie du paysage.

François Pierre Tourneux est maître de conférences en géographie au laboratoire ThéMA de l’Université de Franche-Comté. Ses travaux portent sur le paysage dans ses dimensions objectives et subjectives et sur les dynamiques spatio-temporelles de l’occupation du sol.