



HAL
open science

Théorie des ensembles flous et science géographique : trois champs d'application, des pistes de convergence

Jérôme Dutozia, Karine Emsellem, Christine Voiron

► To cite this version:

Jérôme Dutozia, Karine Emsellem, Christine Voiron. Théorie des ensembles flous et science géographique : trois champs d'application, des pistes de convergence. Rencontres Francophones sur la Logique Floue et ses Applications LFA 2014, Oct 2014, Cargèse, France. hal-01306283

HAL Id: hal-01306283

<https://hal.science/hal-01306283>

Submitted on 22 Apr 2016

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Théorie des ensembles flous et science géographique : trois champs d'application, des pistes de convergence

Fuzzy set theory and geographical science: three application fields, path convergence

J. Dutozia¹

K. Emsellem²

C. Voiron-Canicio³

¹ Université de Nice Sophia-Antipolis, UMR 7300 ESPACE

² Université de Nice Sophia-Antipolis, UMR 7300 ESPACE

³ Université de Nice Sophia-Antipolis, UMR 7300 ESPACE

UNS, 98, Bd Edouard Herriot – BP 3209, 06204 Nice Cedex 3, dutozia@unice.fr
UNS, 98, Bd Edouard Herriot – BP 3209, 06204 Nice Cedex 3, emsellem@unice.fr
UNS, 98, Bd Edouard Herriot – BP 3209, 06204 Nice Cedex 3, voiron@unice.fr

La Géographie et le flou

Résumé :

Cet article traite d'applications de la théorie des ensembles flous à des exemples géographiques. Si la problématique de l'incertitude est relativement peu abordée en Géographie, elle correspond cependant à des enjeux disciplinaires importants, tels que l'évolution spatio-temporelle, l'intégration de données qualitatives linguistiques ou subjectives, et le découpage régional. Ce sont ces thématiques qui seront développées ici, en montrant comment la logique peut être un outil pertinent pour résoudre des questionnements géographiques.

Mots-clés :

Espace, Incertitude, Science géographique, transferts disciplinaires, évolution spatio-temporelle, risques, régionalisation du Monde

Abstract:

This article deals with applications of the fuzzy set theory to geographical examples. If the problematic of the uncertainty is poorly addressed in Geography, it matches important disciplinary issues such as spatio-temporal evolution, integration of linguistic or subjective qualitative data and the delineation of regions. These thematic subjects that are developed here, while showing the logic can be an effective tool to answer geographic concerns.

Keywords:

Space, Uncertainty, Geographical science, transdisciplinary, risks, spatio-temporal evolution, regionalisation of the world.

La théorie des ensembles flous, introduite par Zadeh en 1965 [1], suscite chez les géographes un intérêt tout particulier, puisque l'espace géographique est par essence flou, c'est-à-dire avec des limites imprécises, plus ou moins nettes et continues. Par exemple, un espace polarisé par un centre est un espace imprécis, dans la mesure où l'influence de ce centre ne s'exerce pas uniformément sur toute l'étendue. On peut alors définir un cœur et des marges d'imprécision plus ou moins larges et continues. La formalisation théorique des espaces flous établit que l'appartenance d'un espace à un ensemble peut se valuer par un degré compris entre la valeur 0 (n'appartient pas) et la valeur 1 (appartient) : on arrive donc à positionner sur une échelle l'imprécision et l'incertitude géographiques.

La théorie des ensembles flous est utilisée en Géographie essentiellement depuis deux décennies. Elle permet de modéliser la réalité géographique, autour de deux perspectives. D'une part, elle est pertinente pour formaliser des objets et des processus dont la connaissance est incertaine ou floue. D'autre part, elle permet de modéliser et de représenter

des informations géographiques (données, dire d'expert, etc.) à valeur incertaine.

Ainsi, les travaux des géographes se centrent autour de quatre thématiques, i) la modélisation de la perception des espaces, un espace subjectif étant toujours incertain et imprécis, parce que perçu par une connaissance imparfaite et des filtres cognitifs ; ii) la mesure et la spatialisation de l'évolution des territoires dans le but de détecter des possibilités de changement, en pointant des facteurs spatiaux et des lieux particuliers ; iii) la délimitation des espaces, la logique floue servant à définir des régions imprécises, et par extension un découpage spatial qui admet des zones de recouvrement [2] ; iv) l'utilisation de la théorie des ensembles flous pour construire des faits et des règles qui formalisent le raisonnement spatial [3]. À ces thématiques s'ajoutent des recherches plus abouties dans le cadre du traitement de données incertaines (imprécises, incomplètes, multi-sources, etc.) sous environnement SIG (Système d'Information Géographique) ainsi qu'en analyse d'image. Des enchaînements techniques et méthodologiques, et des formalismes particuliers ont été ainsi mis au point [4].

Trois exemples de travaux géographiques seront présentés, avec pour objectif d'illustrer l'apport du raisonnement flou à la résolution de certaines problématiques, et de comprendre les enjeux des convergences entre flou et Géographie.

1 Estimation du changement spatio-temporel

L'incertitude est omniprésente dans tout ce qui touche aux dynamiques, aux causalités dans les processus d'évolution, aux lieux et dates de survenue des changements, et aux impacts sur le fonctionnement des territoires. La majeure partie des travaux géographiques sur le changement portent sur l'analyse des évolutions passées, sur les facteurs des

transformations des espaces et sur les trajectoires qui les ont conduits à leur état actuel. Or, le changement, est une notion éminemment floue. La démarche habituelle applique aux événements passés, le principe de la plausibilité rétrospective ; le monde est appréhendé en « re-racontant les événements passés à la lumière de ce qui nous paraît leur conférer, après coup, un sens logique » [5]. Quant aux recherches géographiques axées sur l'anticipation des changements futurs, elles reposent sur le postulat que le futur est contenu dans le passé, avec, toutefois, une certaine marge d'imprévisibilité, qui est considérée comme relevant parfois de l'incertitude, lorsque les possibilités d'occurrence d'un phénomène sont identifiées mais pas leur probabilité d'apparition, et/ou parfois de l'indétermination, quand l'évolution du phénomène est ignorée, méconnue ou incomprise [6]. Cependant, cette démarche focalise l'attention sur un cadre qui contient seulement ce que nous voyons puis à généraliser à ce que nous ne voyons pas, et elle ne met pas le scientifique en situation de détecter les phénomènes rares et nouveaux puisque la connaissance est construite en se basant sur la répétition d'événements et ne tient pas compte de ceux qui ne se produisent pas [5]. Ces écueils conduisent, aujourd'hui, à une remise en question de ces méthodes. L'attention se porte sur les notions de possibilité, de plausibilité plutôt que de probabilité. La philosophie des probabilités est notamment réexaminée, en particulier l'interprétation propensionniste de Popper [7], concernant les probabilités d'événements singuliers¹. Ainsi, dans cette optique, de nouvelles méthodes d'anticipation des changements spatiaux focalisent l'attention sur le potentiel de changement des espaces, sur la susceptibilité, la propension des territoires à générer du changement ou à réagir à un événement, sur leur capacité d'adaptation, sur l'identification des leviers et des freins pour

¹ Karl Popper appelle « propensions » les tendances, non visibles, de certains dispositifs physiques à réaliser certains événements possibles et observables.

renforcer l'adaptabilité d'un territoire et potentiellement sa résilience.

Une recherche portant sur l'évaluation des potentialités de changement futur du tissu bâti du centre de Nice illustre cette nouvelle approche. La première étape consiste à sélectionner, à partir de l'état de la connaissance sur la question, les variables susceptibles de déterminer les possibilités de changement du bâti. Au total, 16 variables ont été retenues, caractérisant 4 ensembles de facteurs contribuant au changement d'un lieu: i) la structure du bâti au sein de mailles de 400 m x 400 m ; ii) l'attractivité exercée par une infrastructure et par les projets urbains en cours ou planifiés dans la maille ou dans son voisinage, iii) les actions engagées par la ville en faveur de la durabilité urbaine (rénovation des bâtiments), iv) la sensibilité des habitants au développement durable [8]. L'étape suivante consiste à estimer les changements spatiaux futurs selon 3 différents contextes ou scénarios : le tendanciel dit « au fil de l'eau », le scénario « population engagée » couplant le potentiel de transformation lié à la structure du bâti et la propension des habitants à innover, et le scénario « politique volontariste contre les déperditions d'énergie ». L'information mobilisée est de différentes natures, données de la BD Topo de l'IGN, résultats de l'Enquête Ménages et Déplacements de l'INSEE, enquête sur le terrain pour apprécier le degré de vétusté ainsi que le cachet des bâtiments, résultats d'expertises sur les modes de vie, la sensibilité des acteurs privés au développement durable et la propension au changement qui peut en résulter... L'incertitude se situe à différents niveaux : i), sur les comportements futurs des citoyens et sur la nature de la relation exacte de certaines variables vis-à-vis du changement, comme par exemple l'influence de l'âge des individus, du vote écologiste ou du frein au changement liés au cachet architectural ; ii), sur la significativité des réponses à certaines questions de l'Enquête-Ménage portant sur très peu d'individus ainsi que sur la fiabilité des données disponibles (grand nombre d'erreurs figurant sur la nature des bâtiments

dans la BD-Topo de l'IGN) ; iii) dans l'attribution d'une valeur unique censée caractériser l'ensemble des bâtiments contenus dans une maille. À cela s'ajoute l'imprécision dès lors qu'il s'agit d'apprécier le degré de vétusté des bâtiments ou d'évaluer la zone d'influence d'une opération d'aménagement.

La création du système d'inférence floue est réalisée à l'aide du logiciel de gestion d'inférence floue FisPro 3.5 [9]. Nous avons choisi de calculer séparément les potentiels de changement des 4 ensembles de facteurs afin de pouvoir associer certains d'entre eux en fonction des scénarios. Les grandes lignes de la démarche sont présentées dans le cadre du scénario « au fil de l'eau ». Deux potentiels de changement ont tout d'abord été calculés : l'un relatif à la structure du bâti caractérisée par 5 variables (hétérogénéité, âge, état de vétusté, cachet, présence d'entrepôts) ; l'autre, lié à l'attractivité de la maille (présence du tramway, projet urbain en cours ou programmé). Le nombre de règles de connaissance est généré automatiquement par FisPro mais l'échelle du potentiel de changement (comprise entre 0 et 1) et la valeur de la conclusion de chaque règle ont été déterminées par nos soins. La conclusion des règles est nette ; l'agrégation des règles est disjonctive et l'opérateur est la somme. Pour chacune des règles, la valeur de sortie a été évaluée individuellement. Certaines variables sont estimées avoir plus d'influence que d'autres, le cachet du bâti, par ex. Nous avons jugé qu'un cachet « fort » réduit considérablement les possibilités de changement, quelles que soient les caractéristiques des autres variables dans la règle ; la valeur 0,1 a ainsi été donnée à la conclusion des règles concernées (Tableau 1).

Règle	Active	SI hétéro...	ET présen...	ET age du ...	ET cachet	ET vétu...	ALORS po...
1	✓	faible	faible ou pas ...	faible	faible	faible	0.2
2	✓	faible	faible ou pas ...	faible	faible	moyen	0.25
3	✓	faible	faible ou pas ...	faible	faible	fort	0.3
4	✓	faible	faible ou pas ...	faible	fort	faible	0.1
5	✓	faible	faible ou pas ...	faible	fort	moyen	0.1
6	✓	faible	faible ou pas ...	faible	fort	fort	0.1
7	✓	faible	faible ou pas ...	moyen	faible	faible	0.25
8	✓	faible	faible ou pas ...	moyen	faible	moyen	0.3
9	✓	faible	faible ou pas ...	moyen	faible	fort	0.4
10	✓	faible	faible ou pas ...	moyen	fort	faible	0.1

Tableau 1 – Extrait des règles de connaissance

Dans le scénario « au fil de l'eau », les changements dépendent du potentiel de

transformation lié à la structure du bâti ainsi qu'à l'attractivité liée aux tramways et projets urbains. Un nouveau système d'inférence flou est créé pour combiner les 2 potentiels calculés, selon le même protocole que précédemment. Les valeurs finales du potentiel de changement du bâti sont ensuite cartographiées (Fig 1).

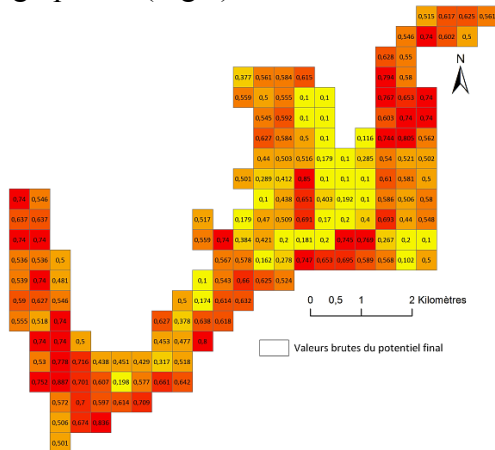


Figure 1 – Cartographie du potentiel de changement du bâti (scenario1).

2 Logique floue et connaissance des territoires à risques

Une autre perspective met en évidence les apports des traitements flous des variables qualitatives linguistiques qui portent sur l'espace. A partir de la spatialisation de la coupure électrique de Barcelone survenue entre le 23 et le 25 juin 2007, nous présentons l'intérêt d'un recours aux concepts d'espaces flous et aux méthodes de traitement de données imprécises dans le champ de l'analyse rétrospective et la délimitation d'événements à risques [10]. En effet, la coupure électrique produit une différenciation spatiale en fonction de l'état d'approvisionnement électrique des différents sous-espaces du système. Si cette différenciation possède bien une réalité « précise » et nette, notre connaissance de cette réalité est, en revanche, limitée par la qualité et l'exhaustivité des informations dont nous disposons pour la délimiter. Le recours à la logique floue est, ici, un moyen de prendre

en compte et de traiter cette incertitude de manière explicite.

Compte tenu de l'absence de données spatiales fines et exhaustives sur les périmètres de coupures électriques, reconstruire *a posteriori* la dynamique spatiale de ce type d'événements impose d'avoir recours à des sources d'informations hétérogènes (presse, témoignages localisés, données quantitatives, forum internet), dont la fiabilité et la précision spatiale peuvent être fortement variables (zone, quartier, rue, lieu précis). La fusion de données hétérogènes nous conduit alors à mettre en œuvre une spatialisation de l'information particulière : d'une part en incluant différents niveaux de grilles imbriquées, auxquelles les informations vont être rattachées en fonction de leur précision spatiale (mailles de 1000 m de côté, 500 m, 100 m, 50 m) [11] ; et d'autre part, en prenant en compte les localisateurs et les quantificateurs flous parfois utilisés dans les récits verbaux décrivant les lieux impactés. La prise en compte des enjeux d'imprécision et d'incertitude intervient donc, essentiellement, à deux niveaux : le premier, lié à la granulométrie des informations sur les espaces affectés par la coupure ; le second lié aux « péri-informations », c'est-à-dire les informations qualitatives textuelles qui entourent les mots désignant les lieux coupés. Dans cet exemple, nous insisterons plus particulièrement sur ce deuxième niveau. Nous constituons, en amont, une base de données géographiques regroupant des lieux désignés comme étant affectés par la coupure électrique. Ces lieux peuvent être des points ou des surfaces à des niveaux de granulométries et de généralisations différents. Leurs superpositions à l'aide de cellules de grilles imbriquées, et l'algèbre des rasters permettent d'agrèger les informations multi-échelles et de proposer un premier indice, dit, de couverture de maille (ICM), qui représente la part de surface d'une cellule de grille recouverte par un périmètre désigné comme affecté par la coupure.

Dans un second temps, nous avons recours à des quantificateurs flous issus des expressions

qui désignent la gravité ou le niveau de complétude du périmètre affecté par la coupure électrique délimitée. Une particularité de notre approche vient du fait qu'elle consiste à gérer le flou textuel par la spatialisation, c'est-à-dire que les intervalles flous désignant un périmètre donné vont être traduits dans l'espace en délimitant un noyau de certitude, au cœur du périmètre désigné, et des marges d'incertitudes en bordure de ces formes.

Par exemple, si l'on considère les informations textuelles simples renvoyant à l'absence du phénomène dans un sous-espace ou l'exclusion d'un sous-espace d'un périmètre impacté (pas, sauf, mise à part...), on attribue la valeur (-2) ; si l'information renvoie à une intensité plutôt faible du phénomène sans être absente (moins, faible, partiel, peu...), on attribue la valeur (1) ; et si l'expression renvoie à une importance forte du phénomène ou à une couverture importante du sous-espace (fortement, considérablement, presque tout...), on attribue la valeur 2. La valeur 3 renvoie aux expressions les plus superlatives (très fortement, le plus grave). À ce stade, il ne s'agit donc pas d'intervalles flous mais d'une échelle de valeurs précises associées à des expressions qualitatives ; pour introduire le flou, on va s'appuyer sur la morphologie des objets spatiaux associés aux informations textuelles, de telle sorte que dans la première bordure (par exemple dans les 100 mètres à l'intérieur du périmètre pour les districts), la valeur de l'information textuelle soit réduite de 50% ; dans la seconde bordure (500 mètres à l'intérieur du périmètre à partir de la limite de la bordure), la valeur est réduite de 20% de telle sorte que nous obtenons des zones de flous en fonction de la distance, considérant que l'information sur les marges d'un périmètre déclaré est plus incertaine que celle portant sur le cœur de ce périmètre, sorte de noyau de certitude. Ainsi, l'on considère que lorsqu'une personne indique « il y a une coupure dans une zone », il y a davantage de fiabilité de l'information sur le cœur de la zone désignée que sur ses bordures. Dans la figure 2, l'expression « peu », n'est pas associée à une valeur précise de 1 mais à un intervalle

allant de 0.5 à 1 en fonction de la position de la cellule par rapport à la géométrie de l'objet signalé pour une coupure électrique. En fonction de la distance au centre de l'objet (axe horizontal) et de la morphologie spatiale des objets appartenant à l'ensemble « coupure électrique », la fiabilité de l'information et donc la valeur de l'indice vont se dévaluer (Fig 2 et 3b).

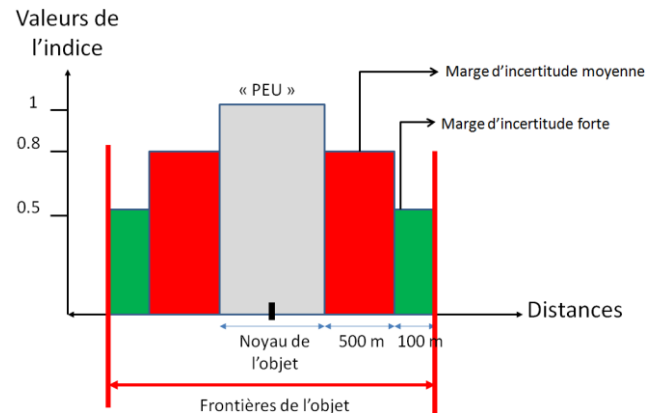


Figure 2 – Délimitation des noyaux de certitudes et des zones d'approximations associées à l'expression « peu ».

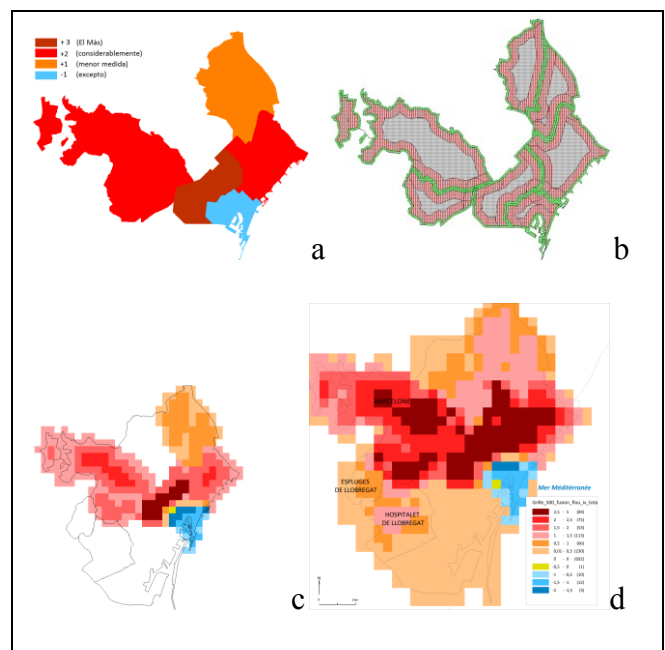


Figure 3 – Traitement de l'information qualitative (a,b,c) et croisement avec les résultats sur les grilles imbriquées (d).

Les résultats de cette méthode sont réattribués à l'échelle de cellules raster (Fig 3c), puis croisés (ici par simple multiplication) avec les indices de couverture des mailles (ICM) obtenus précédemment grâce aux grilles imbriquées (Fig 3d). Pour chaque cellule, on dispose alors d'une propension à appartenir au sous ensemble « coupure électrique » et donc d'une délimitation floue et originale de cet évènement.

3 Cartes mentales appliquées à la régionalisation du monde

3.1 Une base de données multipliant les incertitudes

Enfin, un troisième exemple propose une démarche basée sur la logique floue pour analyser des cartes mentales réalisées à l'échelle mondiale [12], et ainsi régionaliser le monde. Le projet EuroBroadMap « Visions de l'Europe dans le Monde » a permis d'interroger près de 10 000 étudiants dans le monde, afin de récolter des perceptions spatiales collectives de l'Europe, dans une perspective non-eurocentrique.

L'enquête internationale demandait, à chaque étudiant, sur un planisphère vierge, de tracer des régions et de les nommer : l'incertitude et l'imprécision vont découler de ces objets spatiaux non définis a priori. Ces régionalisations spatiales sont alors subjectives et multiples, chaque étudiant délimitant le Monde suivant son expérience, son histoire, son savoir, ses envies, etc.

Les cartes mentales produites comportent de nombreuses incertitudes et imprécisions, parce que les perceptions (et les pratiques) spatiales individuelles sont variées, mais aussi parce que le découpage du Monde n'est pas absolu (jusqu'où va l'Europe par exemple ?), ou du fait simplement des modalités de l'enquête (questionnaire auto-administré dans la langue du pays). Les informations géographiques recensées fournissent des limites spatiales, des toponymes régionaux et des descriptifs

textuels, parfois imprécis (par ex., tracé qui ne correspond pas à des frontières existantes, tracés déterminés par des voisinages), ou ambigus (surnom géographique incohérent, ou tracés qui se superposent, par ex.), ou encore incomplets (région non clairement individualisée par un trait) ou volontairement inexacts (descriptif textuel contradictoire, par ex.).

3.2 formalisation d'une régionalisation mondiale floue

En conséquence, les cartes produites forment des espaces géographiques flous. Elles contiennent des franges spatiales graduelles, des limites individuelles imprécises qui se complexifient si l'on se situe à un niveau collectif, et des situations intermédiaires d'appartenance à une région (Figure 4).

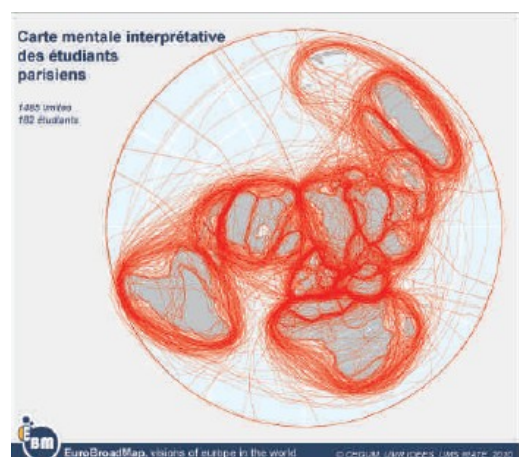


Figure 4 – L'exemple des cartes mentales des étudiants parisiens

Habituellement en Géographie, les cartes mentales sont analysées dans une perspective culturelle et sociale, renvoyant aux caractéristiques particulières de chaque individu : les perceptions spatiales sont rarement modélisées du fait de leur complexité, surtout dans une dimension de groupe. Pourtant des possibilités de recherche existent.

La théorie des ensembles flous permet ici de formaliser ces subjectivités, et de tenir compte des espaces intermédiaires et de chevauchement. Pour cela, à partir d'une grille

de l'espace, chaque unité élémentaire est évaluée par une fonction d'appartenance entre 0 et 100 à une région dessinée par un groupe d'étudiants, pour déterminer des « cœurs » et des « marges » des régions et ainsi individualiser des espaces. Le caractère graduel de la fonction d'appartenance permet aussi de formaliser l'imprécision des limites spatiales. Enfin, le chevauchement des régions et la multi-appartenance des lieux (cf. cas du Mexique par ex) ont été spatialisés par des cartes et des opérateurs d'intersection.

3.3 Un monde de régionalisation floue

Une première perspective, topologique, permet d'interroger toutes les régions, à partir ou autour d'un lieu. Cela permet d'illustrer la concentration spatiale d'une région.

Une seconde approche, toponymique, interroge toutes les régions à partir de leurs noms, ce qui met en évidence les discontinuités spatiales des régions, leurs cœurs et leurs marges, et la forme des limites spatiales. Ainsi, la Figure 5 montre que le cœur de l'Europe présente une forte discontinuité spatiale au Sud.

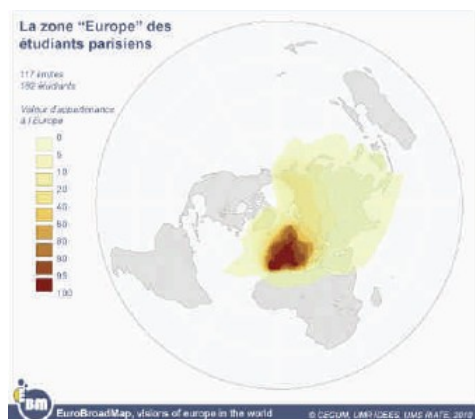


Figure 5 – La région floue nommée « Europe »

Un troisième travail s'intéresse plus aux zones de chevauchement par la spatialisation des intersections, en utilisant des indicateurs T-Norme, de manière exploratoire en géographie [13]. Ainsi, un opérateur d'intersection min a été appliqué [$T = \min(x,y)$], afin d'obtenir la valeur d'appartenance minimale commune entre les régions entrecroisées, et de mettre en

valeur les zones d'intersections les plus fortes (Fig. 6) dans la régionalisation du Monde, comme le Mexique que les étudiants partagent entre l'Amérique du Nord et du Sud.

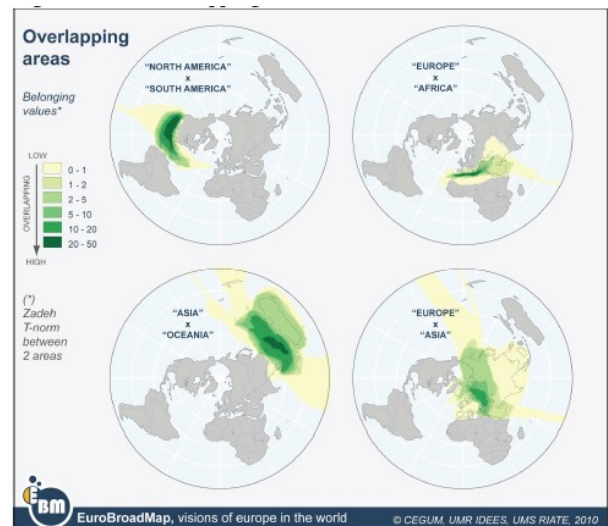


Figure 6 – Des zones de chevauchement calculées par l'indicateur de conjonction min

4 Discussion

À l'instar d'autres sciences, la Géographie ne traite pas de la réalité mais de modèles de la réalité, laquelle est le plus souvent floue. L'espace géographique est alors défini comme « un sous-ensemble flou d'un espace référentiel qui est une portion de la surface du globe, c'est-à-dire un sous-ensemble auquel les composantes spatiales appartiennent plus ou moins » [14]. L'espace géographique flou possède trois caractéristiques majeures qui sont : l'existence d'une différenciation interne, l'imprécision de ses limites et des espaces recouvrables. De plus, si les structures spatiales sont mesurables, la forme et l'étendue de l'espace varient selon les critères retenus ; si l'objet est généralement connu, la définition de sa structure est souvent implicite et l'ensemble des attributs de cette structure sont parfois difficilement quantifiables. Les limites des phénomènes sont parfois nettes – discontinuité, disparité - mais le plus souvent graduelles – frange spatiale, interface – Le raisonnement approximatif, la notion de degré

d'appartenance apparaissent alors plus pertinents que le raisonnement booléen qui sous-tend la détermination des classes en tout ou rien. Pourtant, si la problématique de l'incertitude n'est plus omise des travaux des géographes et si le raisonnement flou est de plus en plus mobilisé pour formaliser la complexité, l'incertitude et le flou ne constituent pas un axe majeur des recherches récentes. Plusieurs raisons peuvent être avancées : un certain malaise face à l'incertitude et l'incomplétude de la connaissance, la place hégémonique de la théorie des probabilités face à la théorie des possibilités, le mépris du qualitatif, le rejet du non mesuré, la méfiance vis-à-vis des variables linguistiques, la réticence à employer le raisonnement approximatif plutôt que le raisonnement booléen conventionnel, enfin, la place relativement faible du courant modélisateur en Géographie.

Références

- [1] L.A. Zadeh. Fuzzy sets. *Information and Control*, vol. 8, no 3, 1965, p. 338-353.
- [2] C. Rolland-May. *L'évaluation des territoires : concepts, méthodes et modèles*. Paris : Hermes Science, 2000.
- [3] S. de Ruffray. *L'Imprécision et l'Incertitude en géographie. L'Apport de la logique floue aux problématiques de régionalisation*. Paris : Université Paris Diderot-Paris 7, mémoire d'habilitation à diriger des recherches, 2007, 284 p.
- [4] R. Jeansoulin, O. Papini, H. Prade, S. Schockaert (eds.). *Methods for Handling Imperfect Spatial Information*, 2010, Berlin, Springer
- [5] N.N. Taleb. *Le cygne noir : la puissance de l'imprévisible*. Paris : Editions Belles Lettres, 2008
- [6] C. Voiron-Canicio. L'anticipation du changement en prospective et des changements spatiaux en géoprospective. *l'Espace géographique*, no 2, 2012, p. 99-110.
- [7] K. Popper. *Un univers de propension. Deux études sur la causalité et l'évolution*. Combas, Editions de l'ECLAT, 1990, 79 p.
- [8] C. Voiron-Canicio, K. Arteau, F. Sant, N. Tortorollo. Assessing possible changes in a town's buildings. Fuzzy logic and 3D simulation applied to the city of Nice. *Actes du 18th European Colloquium of Theoretical and Quantitative Geography*, Dourdan, septembre 2013
- [9] S. Guillaume and B. Charnomordic, Learning interpretable Fuzzy Inference Systems with FisPro, *International Journal of Information Sciences*, doi:10.1016/j.ins.2011.03.025, 181(20), 4409-4427, 2011.
- [10] J. Dutozia. *Espaces à enjeux et effets de réseaux dans les systèmes de risques*, Thèse de Doctorat de Géographie, 313 p., Nice, 25 Septembre 2013.
- [11] J. Dutozia. Compréhension des systèmes de risques, pratiques de terrain et reconstruction à posteriori des dynamiques spatiales d'évènements à partir d'informations qualitatives, hétérogènes, incertaines, imprécises et lacunaires, *Forum Méthodologique de l'UMR ESPACE 6012 CNRS, Terrain et Analyse Spatiale*, Aix-en-Provence, 18 Septembre 2009.
- [12] C. Didelon, S. Ruffray, N. Lambert, M. Bouquet. , *The Cartographic Journal*, vol. 48, pp. 100-107, May 2013
- [13] C. Didelon, K. Emsellem, S. Ruffray, M. Bouquet. Students spaces of belonging on European borders. Colloque de l'AAG (Association of American Geographers), Avril 2013, Los Angeles (Californie - USA).
- [14] C. Rolland-May. La théorie des ensembles flous et son intérêt en géographie, *L'Espace Géographique*, n°1 1987, pp. 42-50.