UTILISER LES INDICATEURS FONCTIONNELS POUR METTRE EN ÉVIDENCE LES STRUCTURES SPATIALES

Un outil interactif pour les acteurs de l'aménagement du territoire européen

par Hadrien Commenges
UMR Géographie Cités

et Timothée Giraud, Nicolas Lambert
CNRS / UMS RIATE UMR

Cet article traite du développement d'une application en ligne permettant d'afficher des cartes basées sur le concept d'indicateurs fonctionnels. Les utilisateurs ciblés par l'application, les acteurs de l'aménagement du territoire européen, ne sont pas familiers avec les méthodes de statistiques et d'analyse spatiale. L'outil est donc conçu pour répondre à trois objectifs : produire une représentation simplifiée et cohérente de l'organisation spatiale (1) ; calculer des indicateurs basés sur le contexte spatial (2) ; intégrer ces fonctionnalités dans une plateforme conviviale (3).

Introduction

La cartographie thématique européenne s'appuie principalement sur des cartes à l'échelle régionale. Plus précisément, la grande majorité des cartes produites à l'échelon communautaire utilise la délimitation officielle des régions européennes (NUTS). Or, les tailles et les formes des régions européennes sont très hétérogènes et produisent des biais d'interprétation. Très attaché à la qualité des documents cartographiques produits en son sein, le programme ESPON[1] est pleinement conscient de ce problème (Grasland & Madelin 2006, Zanin et al 2013).

Pour résoudre ce problème connu sous l'acronyme MAUP, plusieurs méthodes d'interpolation spatiale sont proposées dans la littérature de géostatistique et d'analyse spatiale : interpolations, krigeage, estimation par noyau (Lam 1983). Une de ces méthodes reposant sur l'interaction spatiale, vise à calculer des indicateurs fonctionnels basés sur des données quantitatives absolues transformées de façon à caractériser chaque unité spatiale en fonction de son voisinage.

Ces indicateurs ont deux principaux avantages : (1) ils permettent de produire des cartes plus claires et compréhensibles en simplifiant les organisations spatiales ; (2) ils enrichissent les données statistiques en y intégrant des informations relatives à l'accessibilité. A l'échelle européenne cette simplification sémantique fonctionnelle permet de produire des images lissées des données socio-économiques en prenant en compte le voisinage de chaque région. Au niveau des individus, les avancées théoriques et méthodologiques, principalement la *time-geography* et l'analyse multiniveaux, ont rendu possible l'étude du comportement humain dans son contexte (Kwan 2012, Pred 1977). Du point de vue des unités spatiales, une série de méthodes ont été développées pour identifier des configurations spatiales prenant en compte l'unité dans son voisinage (Anselin 1995). Cet article montre l'intérêt des indicateurs fonctionnels fondés sur la modélisation d'interactions spatiales et leur utilité pour appréhender les territoires insérés dans des contextes territoriaux spécifiques.

Les indicateurs fonctionnels sont parfaitement adaptés à l'aide à la décision de politiques d'aménagement du territoire européen. Néanmoins, pour être utiles aux acteurs européens non spécialistes en analyse spatiale, ils doivent être intégrés dans une plate-forme conviviale et compréhensible. C'est dans ce but qu'a été mise en place l'application en ligne FIT[2] qui permet d'afficher facilement des cartes du territoire européen basées sur ces indicateurs fonctionnels. L'outil est financé par le programme de recherche européen ESPON, qui vise à fournir des éléments scientifiques aux différents acteurs et décideurs politiques européens.

Cet article est organisé en deux parties. La partie 2 développe l'approche conceptuelle relative à l'utilisation des indicateurs fonctionnels. La partie 3 décrit l'outil en

1 http://www.espon.eu/main/
2 http://fit.espon.eu/

tant que tel ainsi que les méthodes implémentées pour répondre aux besoins des utilisateurs.

Indicateurs fonctionnels, approche conceptuelle

MAUP, généralisation cartographique

D'un point de vue géométrique, le maillage géographique est une partition stricte de l'espace en unités de zones contiguës. Celui-ci peut être construit de manière arbitraire (carroyage) ou basé sur des réalités physiques et/ou politiques (bassins hydrographiques, régions administratives). Les éléments constitutifs du maillage sont autant de polygones, réguliers ou irréguliers, imbriqués les uns dans les autres à la manière des pièces d'un puzzle[3].

Au niveau européen, le maillage officiel communautaire est défini par la nomenclature NUTS (Nomenclature des Unités Territoriales Statistiques). Cette nomenclature se compose de trois niveaux hiérarchiques strictement imbriqués : NUTS 1, NUTS 2 et NUTS 3, qui correspondent respectivement en France aux ZEAT[4], régions[5] et départements.

Unités statistiques, les NUTS peuvent concerner aussi bien des délimitations administratives existantes que des divisions ad hoc sans réalité politique. Cette nomenclature vise en fait à créer un cadre cohérent stable dans le temps pour permettre la comparaison des données régionales à l'échelon européen. De manière très concrète, la NUTS est utilisée pour recueillir, partager, analyser et représenter des données statistiques. Aujourd'hui, au niveau européen, 80% des cartes socio-économiques sont faites avec cette division territoriale officielle (Zanin et al., 2013) .

Au-delà d'une simple division administrative, le maillage est également un guide de lecture utilisé pour capturer la réalité spatiale. Le maillage est un système qui agrège, généralise et simplifie l'information géographique, dans le but de l'analyser et de comprendre les phénomènes spatiaux. De manière générale, la maille est un outil de construction de la connaissance qui, par agrégation d'une l'information géographique complexe et diffuse, aide à étudier la répartition des phénomènes dans l'espace. Précisément, le maillage territorial joue le rôle de filtre spatial (Grasland & Madelin 2006). Il s'ensuit que différents niveaux de granularité du maillage permettent de capturer différents aspects des phénomènes spatiaux.

Pour décrire l'influence de la division spatiale (effets d'échelle et effets de zonage) sur les résultats des analyses statistiques, Openshaw et Taylor (1979) ont proposé le concept de MAUP (*Modifiable Areal Unit Problem*). Selon ce concept, chaque maille fournit une clé d'interprétation de l'organisation des phénomènes spatiaux : résultats statistiques, cartographie et modélisation dépendent de la maille. Un changement dans la taille, la forme ou la position de la maille, même infime, peut avoir un impact significatif sur les résultats (*figure 1*).

Qu'est-ce qu'une carte ? Une carte est une représentation schématique de la réalité. L'objectif de la cartographie thématique est d'abstraire et simplifier la réalité dans le but de délivrer des messages spatiaux pertinents et intelligibles. Une spatialisation claire de l'information sur la carte est la condition qui rend le monde réel pensable.

Or, se référant à différentes réalités géographiques et des concepts géographiques non directement comparables, la nomenclature NUTS ne permet pas de décrypter correctement l'organisation de phénomènes spatiaux.

De plus, pour remplir leur fonction discursive, les cartes doivent passer par une phase de généralisation cartographique. L'objectif de la généralisation est d'abord d'éliminer le bruit inutile, mais aussi de mettre en évidence les structures spatiales caractéristiques. Généraliser c'est à la fois éliminer ce qui est inutile et exagérer ce qui est important. En somme, la généralisation est un processus qui réduit une image à ses motifs essentiels. Malheureusement, la généralisation géométrique du fond de carte ne suffit pas à résoudre le problème de l'hétérogénéité de la maille européenne puisque même avec des contours simplifiés, l'hétérogénéité de taille et de forme perdure. Ce problème peut être résolu avec la simplification sémantique (Monmonnier 1991).

Simplification sémantique fonctionnelle

Plusieurs méthodes d'interpolation spatiale sont proposées dans la littérature en géostatistiques et en analyse spatiale : pondération inverse à la distance, krigeage, estimation par noyau… Le principe général est d'estimer des valeurs inconnues sur des points non-observés à partir de valeurs connues sur des points de mesure. Du point de vue cartographique, l'interpolation est souvent utilisée pour obtenir une surface continue à partir d'une série d'observations discontinues (Isaaks E.H. & Srivastava 1989, Longley *et al.* 1999).

3 L'invention du puzzle est attribuée au cartographe John Spilsbury qui, en 1760, eu l'idée de tailler dans une planche de bois les pays du monde.

4 ZEAT : Zone d'études et d'aménagement du territoire

5 Découpage régional avant la mise en œuvre de la loi du 16 janvier 2015 relative à la délimitation des régions.

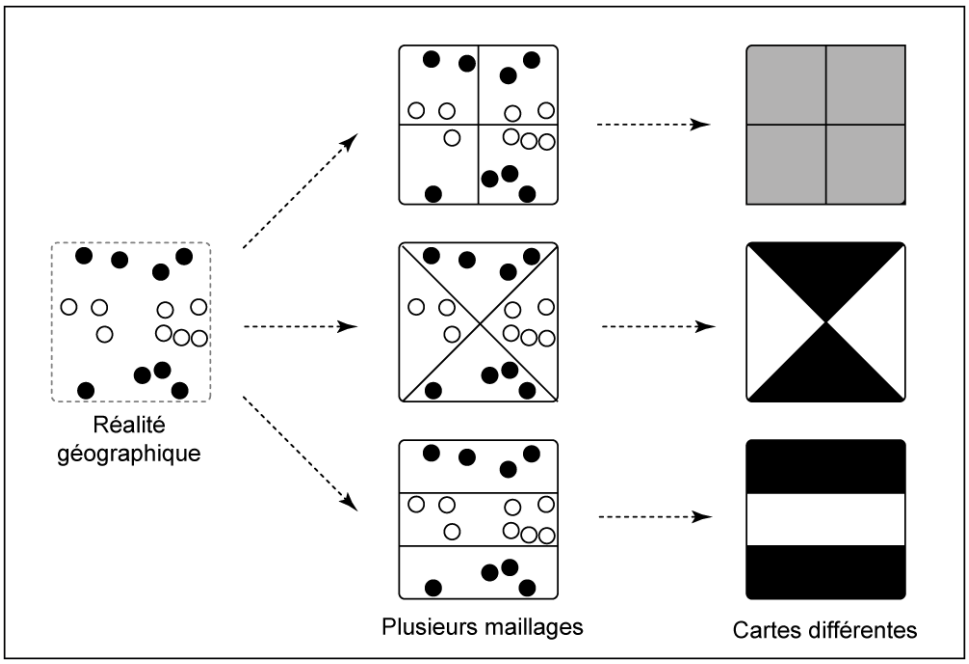

Figure 1 : Modifiable Areal Unit Problem En Europe, la forte variabilité en taille des unités territoriales est un réel problème pour l'analyse statistique et la représentation. Or, issue d'un compromis entre la volonté européenne d'avoir une grille homogène et les réalités administratives nationales, la division NUTS est un maillage hétérogène. Par exemple, les NUTS3 allemands (Kreise) sont cinq fois plus petits que les NUTS3 français (départements)

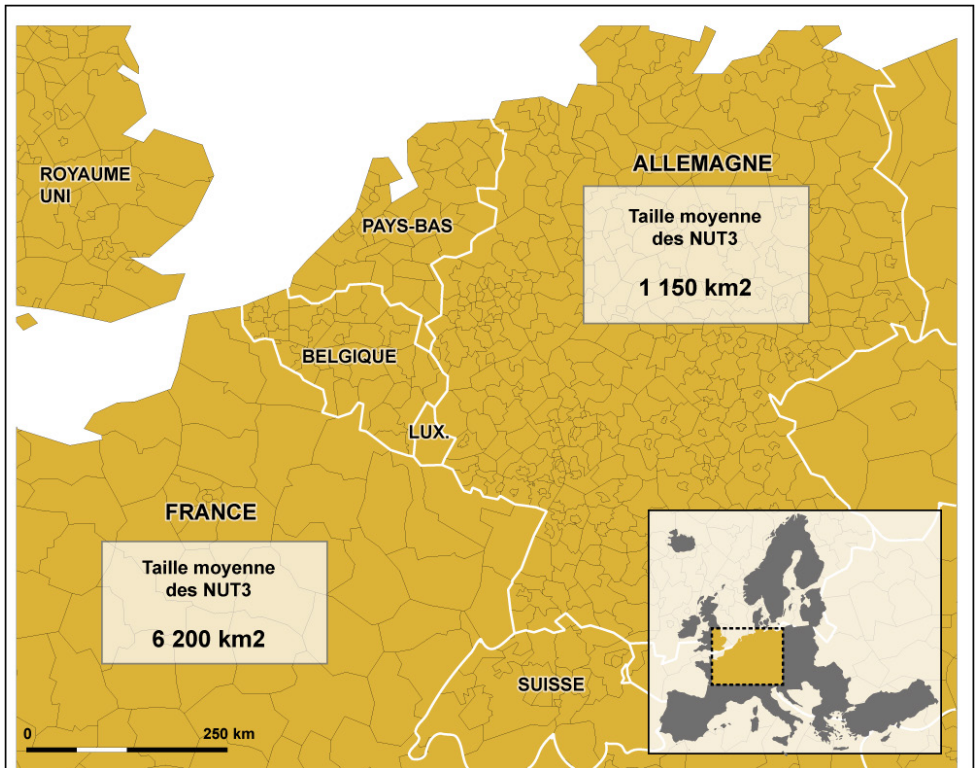

Figure 2 : Hétérogénéité du maillage administratif en Europe (NUTS3)

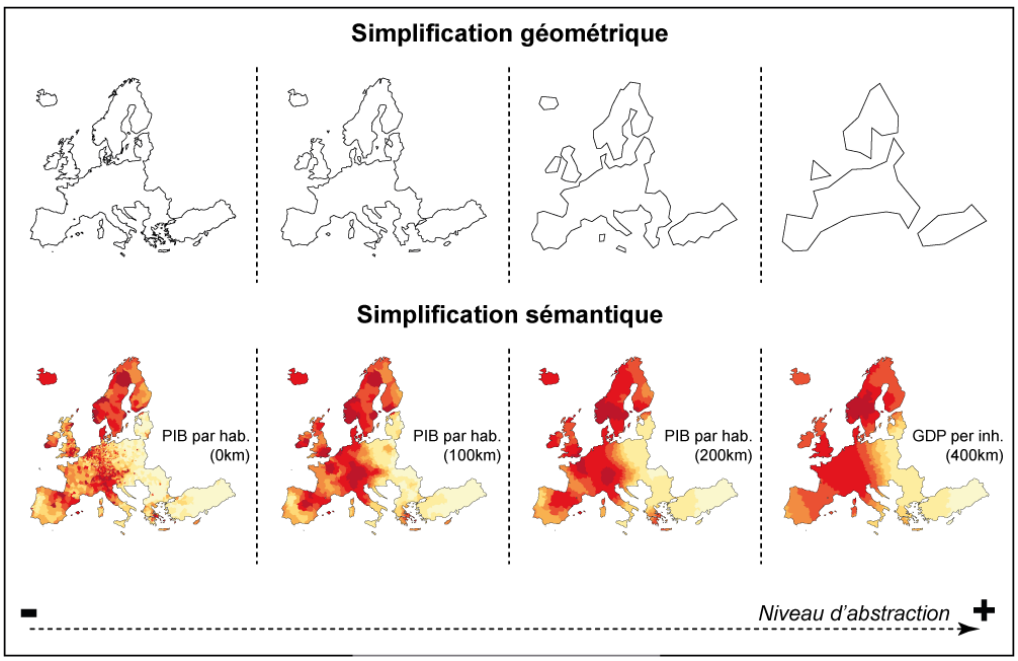

Figure 3 : Simplification géométrique, simplification sémantique.
Il existe de nombreuses méthodes pour simplifier les informations géographiques. La plupart d'entre elles reposent sur l'analyse spatiale et la production de modes de représentation lissés.

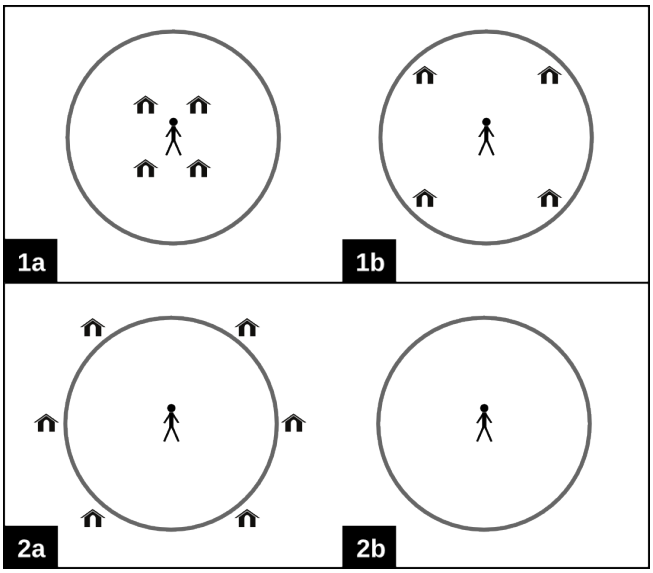

Figure 4 : Accessibilité dans quatre configurations spatiales différentes.

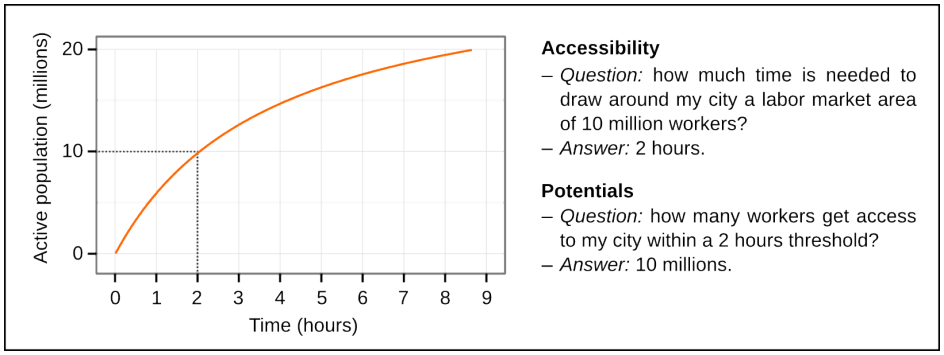

Figure 5 : Interprétation basée sur le temps d'accès ou sur la quantité de stock.

Le calcul d'accessibilités et de potentiels, dans cet article, peut être considéré comme une méthode d'interpolation spatiale. Nous considérons cependant qu'il s'agit plutôt d'une approche par modélisation des interactions spatiales ayant une seconde application pour l'interpolation spatiale. Cette méthode est connue dans la littérature, et selon les disciplines, sous le nom d' «accessibilité potentielle », « potentiel gravitationnel » ou encore « accessibilité gravitationnelle ». Le concept a été développé dans les années 1940 par le physicien John Q. Stewart (1942), par analogie avec le modèle gravitaire. Dans son ouvrage précurseur sur les aires d'influence des universités américaines, Stewart calcule des « potentiels de population ». Ce potentiel est défini comme une quantité de population pondérée par la distance. Dans l'équation 1, A_i représente l'accessibilité en *i*, O_j sont les opportunités en *j* et *f(dij)* est une fonction d'impédance de la distance entre *i* et *j*.

Equation 1. Accessibilité gravitationnelle

La manière la plus simple de mesurer l'accessibilité est de compter le nombre d'opportunités dans une zone prédéfinie. On pourrait considérer que tous les services et commerces sont accessibles à un individu dans un rayon d'un kilomètre autour de son logement et inaccessibles au-delà. L'accessibilité binaire mesurée ainsi (accessible, inaccessible) ne permet pas de distinguer les configurations spatiales spécifiques de la *figure 4*, les situations *1a* et *1b* sont équivalentes (4 lieux sont accessibles), comme les figures *2a* et *2b* (aucun lieu n'est accessible).

$$A_i = \sum_{j=1}^{n} O_j f(d_{ij})$$

En pondérant les opportunités (services, commerces, population…) par une mesure de distance (temps, distance euclidienne) l'accessibilité gravitationnelle est plus subtile. Elle permet de distinguer les situations *1a* et *1b* en donnant aux lieux les plus proches plus de poids qu'aux plus éloignés.

Les indicateurs fonctionnels proposés dans cet article sont conçus en utilisant une fonction d'interaction spatiale représentant la friction de la distance, son impédance. A l'emplacement même d'une opportunité la fonction d'interaction vaut 1, c'est-à-dire que son accessibilité potentielle est de 100%. Plus on s'éloigne de cette opportunité plus la fonction d'interaction tend vers 0. La *portée* est définie comme la valeur où la fonction d'interaction est égale à 0.5 (50%). Du point de vue d'un individu, cette fonction peut être vue comme le degré de disponibilité d'une opportunité donnée. Du point d'une opportunité (un commerce par exemple) la fonction d'interaction peut être vue comme une aire d'influence décroissante : l'attraction est maximale proche de l'opportunité et décroît progressivement avec la distance.

Cet exemple avec des individus et des commerces peut être transféré à des lieux et des variables de stock. L'indicateur gravitationnel aide à distinguer (1) la situation d'une petite ville ou région située dans une zone désertique (2) la situation d'une petite ville ou région située dans une zone densément peuplée. Par exemple, le district de Bastogne en Belgique est une petite unité dans le cœur dense de l'espace européen tandis que Pinhall Interior est une petite unité située dans une zone très faiblement peuplée.

Le calcul de l'accessibilité (ou potentiel) gravitationnelle produit deux types de sorties nommées *accessibilité* et *potentiel*. Ces deux mesures considèrent le même phénomène selon deux aspects : les temps d'accessibilité (l'accessibilité), les stocks potentiellement accessibles (potentiels). L'accessibilité mesure la distance (ou le temps) nécessaire pour atteindre un certain stock. Le potentiel mesure le stock situé autour d'un lieu à une certaine distance (ou temps).

Un outil adapté à un contexte d'utilisation spécifique

Contexte d'utilisation

La discussion sur les indicateurs fonctionnels s'appuie sur le développement d'un outil déployé dans un contexte spécifique. La commande de l'outil vient d'un programme d'aménagement du territoire européen, ESPON, dont l'objectif principal est de « soutenir le développement de politique*s en relation avec les objectifs de cohésion territoriale et de développement harmonieux du territoire européen* ».

Le programme ESPON a développé une série d'outils destinés à l'usage des acteurs et praticiens de l'aménagement du territoire européen à toutes les échelles pertinentes. La plupart des outils sont en ligne et disponibles pour le grand public (chercheurs, étudiants, décideurs…) contribuant ainsi au développement et à la consolidation d'un savoir commun sur l'aménagement du territoire européen en s'appuyant sur les données produites dans le cadre du programme ESPON.

La demande du programme ESPON était de construire une application pour produire et afficher des indicateurs relatifs à la cohésion territoriale à l'échelle des régions européennes dans une interface conviviale. Ces indicateurs ont quatre objectifs principaux : (1) prendre en compte les effets des réseaux de transport sur les territoires, (2) permettre de comparer les régions entre elles, (3) simplifier l'information spatiale déformée par l'hétérogénéité du maillage, (4) rendre compte du contexte spatial de chaque région. Une difficulté

supplémentaire était de construire un outil destiné à des utilisateurs qui ne sont pas forcément formés à l'analyse spatiale.

Dans ce contexte, les modèles d'interaction spatiale ont trois principaux avantages :

- ils sont facilement interprétables et compréhensibles par un public non spécialiste de l'accessibilité ;
- les modèles d'accessibilité et de potentiels peuvent être utilisés aussi bien pour évaluer l'efficacité de réseaux de transports, que pour décrire l'interaction entre les unités spatiales et les réseaux de transport ;
- ces méthodes de modélisation sont utiles pour alimenter et enrichir dynamiquement des bases de données d'indicateurs de stock.

Calibrage du modèle

Dans ce contexte d'utilisation, deux éléments doivent être pris en compte pour calibrer le modèle : le choix de la fonction d'impédance (friction de la distance) et ses paramètres. Nous avons choisi la fonction en amont pour simplifier l'utilisation de l'outil. Le choix des paramètres est laissé à l'utilisateur.

Les deux principales fonctions d'impédance utilisées généralement dans les modèles d'interactions spatiales sont les fonctions puissance et exponentielle (*figure 6*). Dans le domaine de la modélisation des réseaux de transport, les fonctions exponentielles sont les plus utilisées car elles correspondent mieux aux temps de transport en milieu urbain (Evans 1970, 1971). Les fonctions puissance et exponentielle peuvent aussi être combinées pour mieux refléter les données empiriques.

L'outil doit utiliser une fonction pouvant être mobilisée dans un large champ d'applications et de contextes. Nous avons donc choisi la fonction exponentielle : ce choix est pertinent au regard de différentes études utilisant les modèles d'interactions spatiales menées dans le domaine des transports (Isaaks & Srivastava 1989, Grasland et al. 2000). L'exposant de la distance est fixé à 3 définissant ainsi une pente fortement décroissante.

Du côté des utilisateurs, plusieurs paramètres peuvent être définis. En fonction de ses besoins, l'utilisateur peut afficher cartes de potentiels ou d'accessibilités (*figure 5*). Il peut définir la variable représentée, le mode de transport, l'année de référence et la portée de la fonction.

Trois variables facilement interprétables sont disponibles : population totale, population active et produit intérieur brut.

Quatre portées sont proposées pour rendre compte de scénarios réalistes : une heure pour les interactions journalières, deux heures pour les interactions hebdomadaires, quatre heures pour les interactions mensuelles et huit heures pour les interactions occasionnelles. Les portées concernant les accessibilités sont exprimées en part du total européen, les valeurs absolues n'étant pas aisées à interpréter.

Quatre modes de transport sont disponibles : aérien, ferroviaire, routier, le plus rapide.

Les indicateurs sont disponibles à trois dates : 2001, 2006 et 2011.

La *figure 7* montre l'organisation de l'interface de l'application.

Exemple d'utilisation

Les politiques publiques visant à améliorer la cohésion territoriale européenne s'appuient souvent sur les inégalités de richesses à l'échelle des régions européennes. Les indicateurs fonctionnels appliqués au PIB apportent une information supplémentaire en prenant en compte le contexte territorial ce qui permet aux décideurs de prendre des décisions plus avisées.

Ainsi le *tableau 1* et les *figures 8, 9* et *10* montrent que certaines régions ont certes un faible niveau de richesse mais s'insèrent dans un contexte économique plutôt favorable, par exemple les régions de l'est de la Belgique. D'autres régions, ayant un niveau de richesse

		PIB régional en millions d'euros	Potentiel de PIB à deux heures par la route en millions d'euros	
Régions de l'est du Portugal	Serra da Estrela	385	21899	x 57
	Pinhal Interior Sul	478	31342	x 66
	Beira Interior Sul	1049	24988	x 24
	Beira Interior Norte	1161	21762	x 19
Régions de l'est de la Belgique	Arr. Bastogne	1067	207285	x 194
	Arr. Waremme	1225	317016	x 259
	Bezirk Verviers	1831	232879	x 127
	Arr. Huy	2612	270214	x 103

Tableau 1.

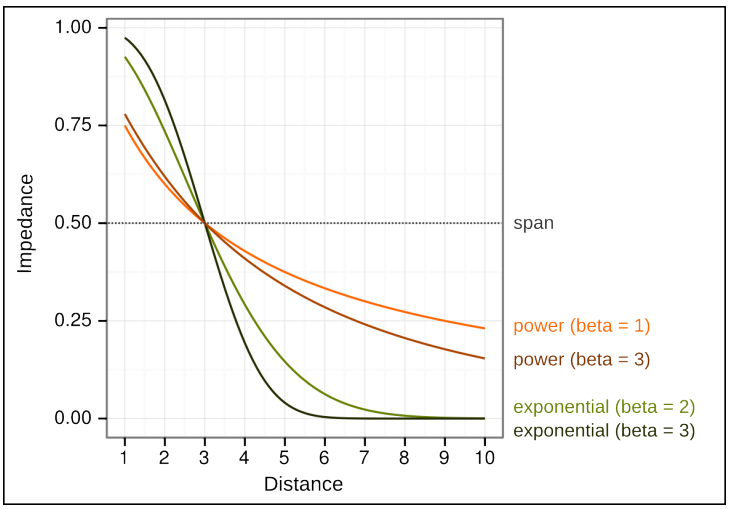

Figure 6 : Choix et calibrage de la fonction d'impédance

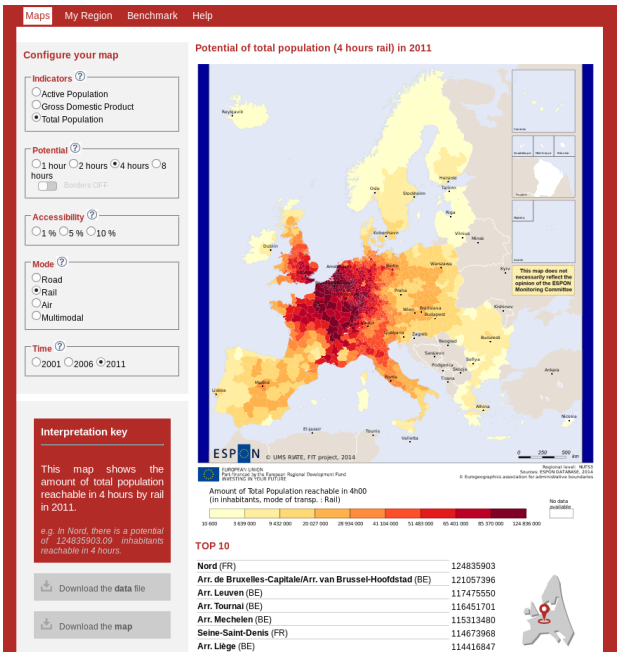

Figure 7 : Functional Indicators Tool.

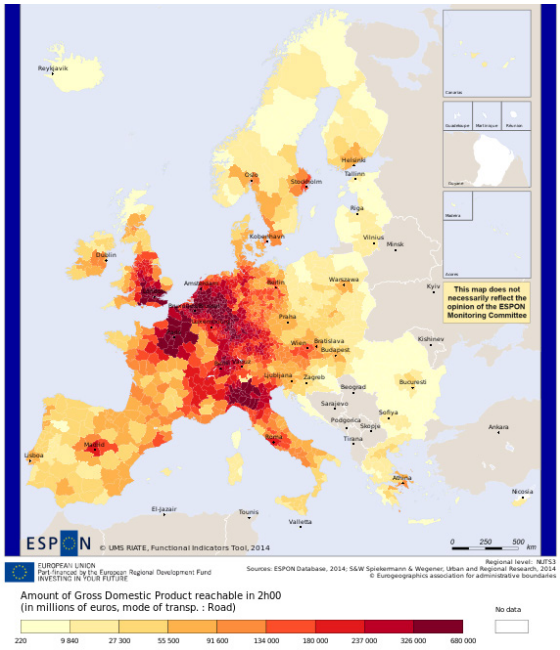

Figure 8 : Potentiel de PIB (2 heures par la route) en 2011

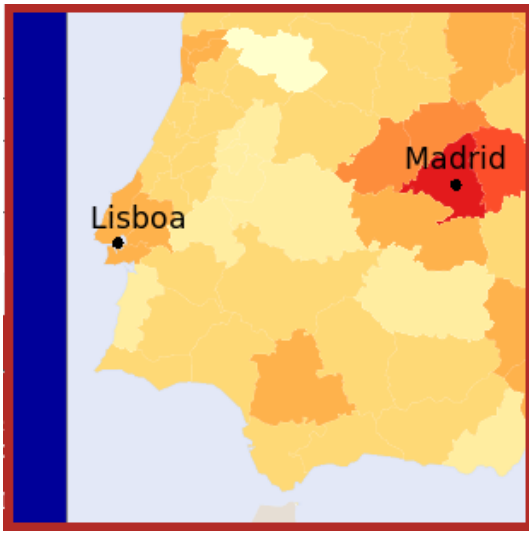

Figure 9 : Zoom sur les régions de l'est du Portugal

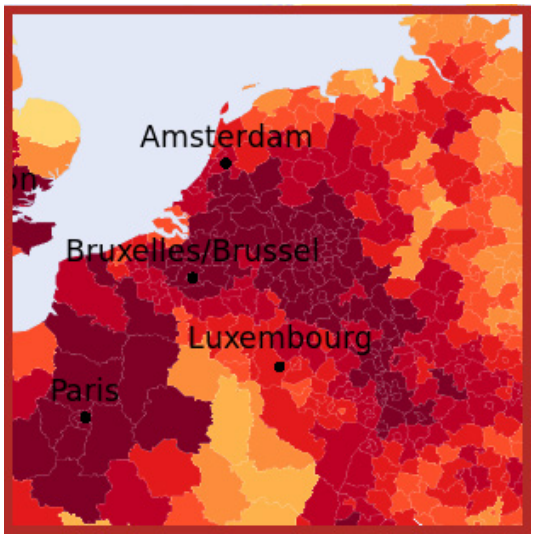

Figure 10 : Zoom sur les régions belges

comparable, se trouvent dans un contexte territorial nettement moins favorable, par exemple les régions de l'est du Portugal.

Conclusion

Les indicateurs fonctionnels ne sont pas de simples méthodes d'interpolation, elles sont surtout à considérer comme des méthodes de mesure des interactions spatiales.

Dans le cadre d'une utilisation par des décideurs, les indicateurs fonctionnels peuvent être utilisés pour répondre à des questions telles que : *quelles et la taille d'un bassin d'emploi potentiel autour d'une région donnée ?, quel montant de richesse est produit par ma région et son voisinage ?*

Les indicateurs fonctionnels sont parfaitement adaptés pour explorer et évaluer les politiques territoriales. Néanmoins ils doivent être proposés à travers une plateforme facile d'utilisation directement utilisable par des utilisateurs non spécialistes. L'outil proposé répond à trois besoins : (1) produire et cartographier une représentation simplifiée de l'espace, (2) calculer des indicateurs prenant en compte le contexte territorial, (3) proposer ces fonctionnalités dans une plateforme conviviale.

Développé grâce à des technologies open source, l'outil est généralisable à d'autres espaces et d'autres thématiques[6].

Bibliographie

Anselin L. (1995) «Local Indicators of Spatial Association - LISA», Geographical Analysis, 27/2: 93-115.

Evans AW. (1970) Some properties of trip distribution methods. Transportation Research, 4(1), 19-36

Evans AW. (1971) The calibration of trip distribution models with exponential or similar cost functions. Transportation research, 5(1), 15-38

Grasland C, Madelin M et al. (2006) The modifiable areas unit problem. ESPON project 3.4.3

Grasland C, Mathian H, Vincent JM. (2000) Multiscalar analysis of map generalisation of discrete social phenomena. Statistical problems and political consequences», Statistical Journal of the United Nations, 17: 157-188

Isaaks EH, Srivastava RM. (1989) An introduction to applied geostatistics, New York: Oxford University Press

Kwan M-P. (2012) «The Uncertain Geographic Context Problem», Annals of the Association of American Geographers, 102/5: 958-968

Lam, N. S-N. (1983) «Spatial interpolation methods: a review», The American Cartographer, 10(2): 129-139

Longley PA, Goodchild MF, Maguire DJ, Rhind DW (eds) (1999) Geographical information systems: principles and applications, New York: Wiley & Sons

Monmonier M. (1991) How to lie with maps. 1991. Chicago UP

Openshaw S., Taylor, PJ. (1979) A million or so correlation coefficients: three experiments on the modifiable areal unit problem. Statistical applications in the spatial sciences, 21, 127-144

Ortúzar JD, Willumsen LG. (2011) Modelling transport, 4th edition, Chichester: Wiley

Pred A. (1977) «The Choreography of Existence: Comments on Hägerstrand's Time-Geography and Its Usefulness», Economic Geography, 53/2: 207-221.

Stewart JQ. (1942) Measure of the influence of a population at a distance, Sociometry, 5(1): 63-71.

Zanin C., Lambert N., Grasland C., Davoine P-A., Mathian H., Saint-Marc C. (2013) ESPON Cartographic Language

6 Voir la plateforme « Func-i », plateforme de calcul et de visualisation d'indicateurs fonctionnels : https://github.com/Groupe-ElementR/funci