LES CARTOGRAMMES UNE SÉQUENCE D'ENSEIGNEMENT DE LA SÉMIOLOGIE À LA GÉOGRAPHIE

par Dominique Andrieu

MSH Val de Loire - USR 3501
33 Allée Ferdinand de Lesseps 37 204 Tours Cedex 03
dominique.andrieu@univ-tours.fr

Cette contribution souhaite montrer l'intérêt des cartogrammes dans l'enseignement de la cartographie et dépasser ainsi la simple capacité à communiquer que l'on prête à ces représentations. Les cartogrammes permettent d'aborder successivement la sémiologie, où ils ont une vraie légitimité, la géomatique, par l'appréhension de nouvelles dimensions de l'espace, et la géographie, par les nouvelles formes spatiales qui interrogent les pratiques spatiales des sociétés. Ces « transformations cartographiques de poids » représentent ce maillon manquant à l'esprit de la Sémiologie graphique de J. Bertin, c'est-à-dire le traitement d'une information quantitative en implantation zonale par une variation de taille, au même titre que la variation de la taille des symboles ponctuels ou de l'épaisseur des lignes. Au-delà de cet aspect sémiologique, les cartogrammes présentent des dimensions inhabituelles de l'espace. La nouvelle unité de mesure de l'espace crée des augmentations ou des réductions des surfaces topographiques. Pour la géomatique, elle est l'occasion d'aborder les notions de topologie. En effet, si la proportionnalité des surfaces à une quantité donnée est la première condition de construction des cartogrammes, elle doit aussi respecter les contiguïtés des entités surfaciques. Cette double condition est alors contraignante, par exemple, pour des cartogrammes de la population. Les recouvrements ou les ruptures entre polygones sont de très bons exemples d'application de règles topologiques garantissant la continuité de l'espace. Ensuite les formes produites par les dimensions de l'espace du cartogramme permettent de découvrir ou redécouvrir des territoires maintes fois traités en enrichissant leur compréhension. Elles ouvrent l'enseignement de la géographie sur les sujets de l'urbanisation, des centres de villes, des périphéries, des pratiques spatiales, etc. Ainsi l'enseignement des cartogrammes compose une séquence complète depuis la sémiologie, jusqu'à l'interprétation géographique de ces représentations spatiales en passant par les outils de la géomatique. Ces représentations montrent l'importance de bonnes pratiques en sémiologie graphique sur la connaissance géographique des espaces.

La *Sémiologie graphique* de J. Bertin (1967) propose un langage pour la cartographie, enseigné aux étudiants comme un ensemble de règles à suivre afin de produire des cartes efficaces. Appliquées à la carte, c'est-à-dire à une image réduite du monde et de son espace exprimés dans les deux dimensions du plan, ces règles ont pour objectif de traduire une information géographique en signes graphiques inscrits dans les deux dimensions spécifiques de l'espace. L'efficacité de cette image abstraite du monde s'évalue par conséquent par les fonctions de communication, mais aussi par sa fonction de « révélateur de structures sous-jacentes » géographiques décrite par C. Cauvin (1997). Pour J. Bertin (1967), l'efficacité est la facilité à répondre correctement à une question donnée et par conséquent au message porté par le système graphique mis en place sur la carte. Elle s'inscrit dans les moyens de communication en transmettant un message destiné à un public défini. La sémiologie proposée aux cartographes et enseignée aux étudiants se fonde sur l'efficacité graphique dans la transmission du message.

Lorsque les propriétés et les caractéristiques de l'espace sont reproduites par la carte, les choix graphiques décrivent alors les formes et les organisations géographiques du territoire. R. Brunet (1987, p.137) indique clairement que « c'est par ses formes que la carte « parle », « c'est par les distributions qu'elle s'exprime ». La sémiologie est au service de la connaissance de l'espace géographique communiquée par la carte. C. Zanin et M.-L. Trémelo (2003, p.13) décrivent cette double efficacité attendue du langage graphique, dans une démarche pédagogique. Dans le cadre d'un enseignement destiné à des étudiants de niveau master, il s'agit, dans cette contribution, d'aborder l'efficacité d'un aspect précis de la sémiologie : nous traiterons la représentation d'une information quantitative en implantation zonale. Outre l'aspect pédagogique de ce sujet, ce choix s'appuie sur un constat d'insatisfaction qui s'exprime dans la littérature à propos des solutions graphiques cartographiant ces informations. Pour comprendre cela, il convient de reprendre la construction du langage graphique édicté par J. Bertin. Il s'articule autour de choix organisés en trois types d'implantations spatiales (point, ligne et zone) et en trois types d'informations géographiques (qualitatif, ordonné et quantitatif). Concernant l'information quantitative au cœur du sujet, C. Zanin et M.-L. Trémelo (2003) distinguent les quantités relatives des quantités absolues, qui ne mobilisent pas les mêmes solutions graphiques. Parallèlement elles différencient

des relations ordonnées pour des informations quantitatives ou qualitatives. Nous nous plaçons ici, dans le traitement d'une information quantitative absolue (ou « brute »), avec laquelle le calcul des sommes garde du sens : par exemple, le résultat de l'addition du nombre d'exploitants agricoles dans les 22 régions françaises est équivalent au nombre recensé sur toute la France, ce qui n'est pas vrai, par exemple, pour les pourcentages régionaux d'exploitants agricoles sur la population active.

Cette précision étant faite, les trois implantations spatiales croisées avec les trois types d'information géographique concourent à créer neuf configurations cartographiques, pour lesquelles six variables visuelles sont définies et mobilisées. Ces variables que sont la forme, l'orientation, le grain, la couleur, la valeur et la taille, sont les composants graphiques élémentaires du langage cartographique. Leurs combinaisons appliquées à des extensions spatiales réduites avec leurs propriétés et leurs contraintes rendent l'exercice particulier et parfois complexe pour aboutir à l'efficacité attendue.

Si des solutions existent au traitement d'une information quantitative en implantation zonale, elles « n'ont jamais donné entière satisfaction » affirme J.-P. Bord encore aujourd'hui (2012, p.113). Pourtant, l'une d'elles est travaillée avec les étudiants, celle des anamorphoses et plus particulièrement des cartogrammes, dont le choix a une triple justification : sémiologique, géomatique et géographique. Ces trois disciplines interviennent dans la construction d'une carte, composant ainsi une séquence complète de formation portant sur les cartogrammes. J. D. Salachas et J.-P. Bord (2012) proposent l'échelonnement en cinq étapes du processus de construction d'une carte qui forme ainsi la trame de la séquence de formation :

- Définition du problème : elle constitue le point de départ de tout travail cartographique et la présentation de cette séquence a pour objectif de cartographier une information quantitative absolue en implantation zonale. Le sujet géographique se prêtant à ce type traitement est le suivant : « Comment cartographier la population des comtés du Kansas pour percevoir leurs masses, évaluer les variations de proportions entre les comtés et révéler la structuration dans l'espace de l'État. »

- Tableau des données : le fond de carte est proposé en figure 1 ; il est fourni aux étudiants avec le nombre d'habitants. Le choix des comtés du Kansas aux États-Unis est volontaire car leurs formes plutôt quadrangulaires sont géographiquement homogènes et probablement inconnues dans notre hexagone français. Il vise à montrer qu'il n'est pas nécessaire d'avoir de référence cartographique « familière » (Eckert et al., 2008) pour comprendre l'espace décrit par les anamorphoses. Un tel espace vierge de toute habitude apparaît idéal pour apprécier l'apport des solutions cartographiques au problème posé.

- Choix d'un langage graphique : il s'agit ici d'aborder la traduction d'une série statistique donnée à l'étape précédente, en signes graphiques et de montrer que les cartogrammes ont toute légitimité dans la sémiologie graphique.

- Traitement des données : cette phase permet d'utiliser deux applications de géomatique. La première est spécifique à la construction du cartogramme et la seconde est un logiciel de systèmes d'information géographique (SIG).

- Interprétation : en plus de la fonction de communication prêtée à ces représentations spatiales (Cauvin et al., 2008; Barford, 2008), l'interprétation géographique est privilégiée puisque l'objet de la démarche est d'observer une organisation géographique de la population par les cartogrammes.

Ce déroulement est celui repris dans notre présentation composant la séquence de formation. Les deux premières étapes sont présentées aux étudiants, puis la séquence aborde la réponse sémiologique au sujet. La solution des cartogrammes légitimée par cette première partie est ensuite appliquée pour obtenir des représentations de l'espace, qui sont interprétées par leur apport à la connaissance des territoires. Dans la pratique cet ensemble complet en trois étapes d'un enseignement sur les cartogrammes est abordé avec des étudiants dans le cadre de projets de groupe ou projets de fin d'étude de l'École polytechnique universitaire de Tours. En effet, cette séquence nécessite de comprendre et maîtriser les règles de base de la cartographie et notamment la sémiologie qui est en général présentée aux étudiants dès les premiers semestres de leur cursus. Elle requiert aussi la manipulation d'applications informatiques enseignées parallèlement ou ultérieurement. Chacune des trois étapes peut être mobilisée dans d'autres situations d'enseignement de façon indépendante les unes des autres : par exemple pour une intervention dans le cadre d'une initiation à la cartographie, l'aspect sémiologique a été mobilisé auprès d'étudiants de licence professionnelle Statistique de la protection sociale. Par conséquent, si les cartogrammes sont présentés ici sous la forme d'une séquence complète, il est envisageable de les adapter en fonction des pré-requis des étudiants.

L'approche sémiologique : le zonal-quantitatif

Données d'un problème de taille

Parmi les neuf configurations cartographiques présentées précédemment, le caractère quantitatif absolu d'une information statistique est traduit par la variable visuelle de taille. La taille d'un figuré, d'un symbole géométrique par exemple, est alors la seule variation exprimant graphiquement une quantité. La dimension des symboles n'est plus mesurée par la métrique de l'espace représenté, définie par l'échelle cartographique. L'unité de mesure définissant la taille des symboles n'est donc plus le mètre décrivant l'espace, mais celle définissant l'information statistique à cartographier : le nombre d'habitants dans notre cas. Lorsqu'un figuré représente une information statistique qualitative, le choix de sa taille dépend uniquement de sa visibilité dans la carte. La taille est alors abstraite et sans aucune valeur au regard des dimensions de l'espace cartographié. Il n'en est pas de même pour l'information quantitative dont la taille définit la dimension de la surface d'un symbole (comme le cercle) en implantation ponctuelle ou l'épaisseur d'une ligne pour l'implantation linéaire.

Pourtant ces formes, dont la taille est régie par un système de mesure spécifique à l'information statistique qu'elles représentent, se superposent aux dimensions et à la métrique de l'espace cartographié. La carte est alors composée de deux unités de mesure différentes, l'une thématique (nombre d'habitants, revenu, production de gaz à effet de serre, etc.) et l'autre géographique, les dimensions du terrain traduites par l'échelle. En implantation zonale, cette double dimension affectée à l'espace pose problème : le cartographe devrait à la fois employer la variation de la taille d'une zone pour exprimer une quantité tout en gardant les deux dimensions planimétriques de la carte.

Les solutions graphiques

Cette impasse a été contournée par l'invention de méthodes faisant des concessions à la sémiologie graphique. Nous détaillerons les trois principales solutions, de la plus courante, mais reniée par l'auteur de la *Sémiologie graphique*, à la plus méconnue, mais légitime aux yeux de J. Bertin :

- **Un seul signe ponctuel proportionnel** (très souvent le cercle), voir la figure 2 : la taille de la surface varie suivant la quantité de chaque zone. Cette solution est la plus courante, elle est proposée dans les applications cartographiques et les SIG. Pour J. Bertin (1967), elle réduit la représentation d'une implantation zonale à un simple point positionné au centroïde de chaque zone et n'est donc pas souhaitable. L'extension spatiale des surfaces jusqu'à ses limites n'est plus représentée par cette simplification. De nombreux auteurs admettent la faiblesse de cette solution (Blin, Bord, 1995 ; Béguin, Pumain, 2000 ; Cauvin *et al.,* 2007), mais il est difficile d'en faire l'économie tant elle est simple à mettre en œuvre. Sa seule contrainte est la lisibilité des cercles superposés sur des espaces où le maillage est très fin. La solution proposée est de réaliser un agrandissement de ces espaces critiques dans un « carton ».

- **Les points égaux** ou **carte par points** répartis dans chaque zone en fonction de la quantité, voir la figure 3. Cette solution préconisée par J. Bertin (1967) est toutefois soumise à des contraintes visuelles dès que la concentration du phénomène dans une zone ne permet plus de distinguer les points ou d'en mettre le nombre suffisant pour représenter la quantité. On propose alors de réaliser un « cornet » qui évoque une élévation en 3D (Bertin 1967). Malheureusement, il n'est pas évident que l'effet d'une troisième dimension soit perçu correctement par tous immédiatement : sur la figure 3, voit-on une élévation en 3D ou un axe géographique de peuplement qui semble sortir des limites du comté et de l'État au nord-est du Kansas ? Inversement la localisation d'un point dans de vastes espaces peu denses devient un problème : où situer ce point qui représente un phénomène éparpillé dans l'espace ? Il est alors conseillé de valider la localisation par des informations géographiques complémentaires : atlas ou couche d'information géographique permettant la différenciation interne à la zone. Cette localisation isolée pourrait laisser croire que ce qui est cartographié se place là, à la position du point et nulle part ailleurs.

- **Les points Bertin**, figure 4 : cette solution porte le nom de son inventeur (Blin, Bord, 1995). J. Bertin propose en effet un semis régulier de points dont la taille varie en fonction de la quantité à répartir sur le nombre de points dans chaque zone. Cette méthode convertit l'implantation zonale en un ensemble de points, moins réducteurs qu'un point unique. Si son principe de construction est simple en soi, elle a très peu été appliquée, car avant l'ère de l'informatique, sa mise en œuvre manuelle était fastidieuse : choix du pas de la grille qui portera les points, décompte dans chaque zone du nombre de points qui sera utilisé pour diviser la quantité et ainsi définir la taille des points. Si J. Bertin lui-même espérait son automatisation (Bertin, 1966, cité par Jégou,

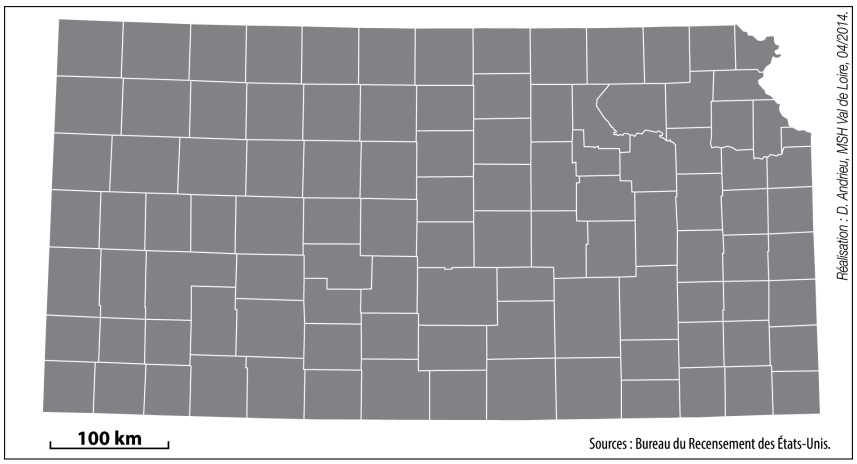

Figure 1 : Les comtés du Kansas

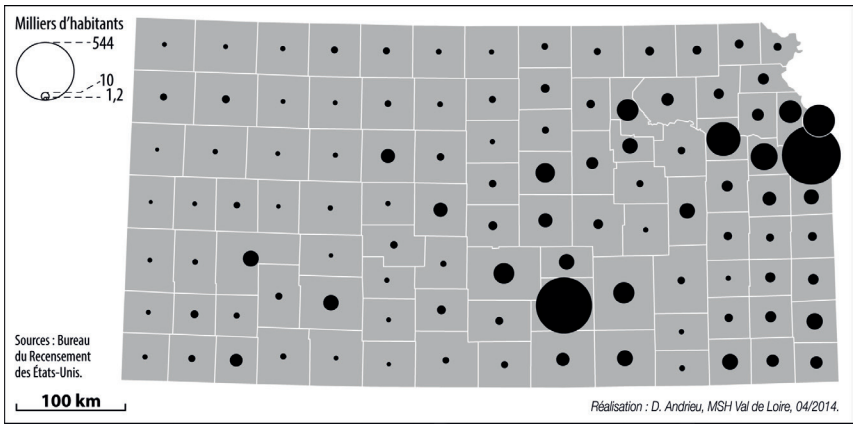

Figure 2 : La population des comtés du Kansas en 2010 par les cercles proportionnels

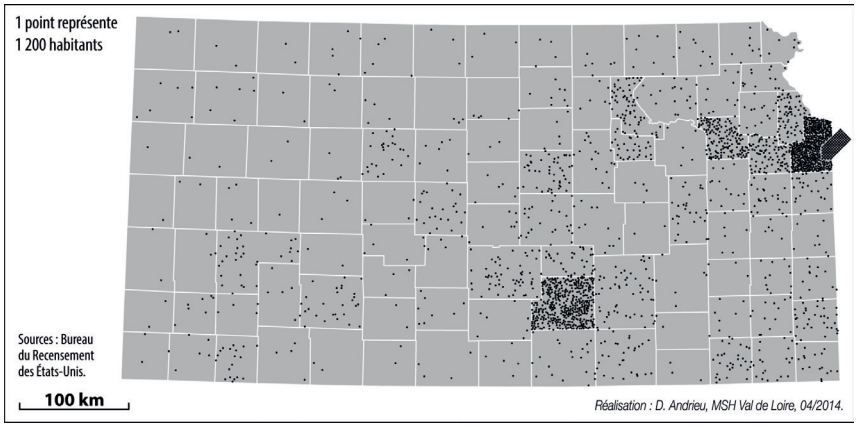

Figure 3 : La population des comtés du Kansas en 2010 par les points égaux

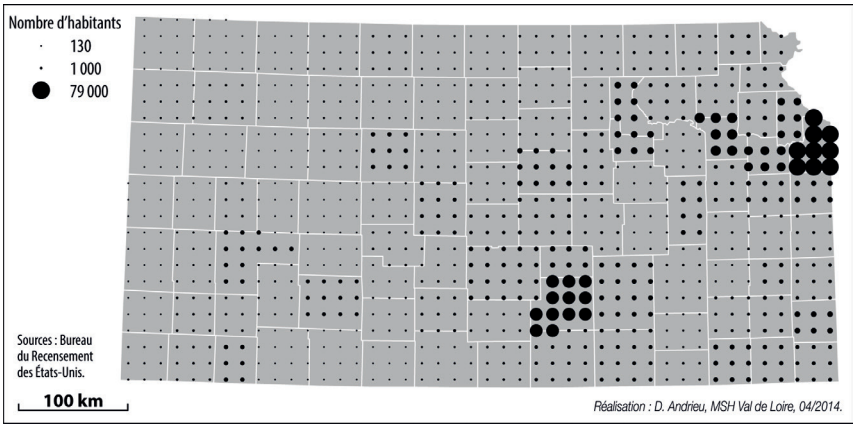

Figure 4 : La population des comtés du Kansas en 2010 par les points Bertin

2008), les applications informatiques actuelles n'ont pas repris cette méthode dans leur solution cartographique : à ce jour seul le logiciel Cartes & Données la propose…

Il existe une autre solution développée par J. Bertin, avec l'élévation en 3D de la quantité mais exprimée sur les deux dimensions d'une feuille, elle devient factice. Les effets de masques et les proportions des quantités moyennes éloignées entre elles ne sont par réellement perceptibles.

L'effet visuel de ces solutions

Une évaluation de l'efficacité de ces trois solutions est nécessaire pour comprendre leurs limites, en ayant en mémoire que la carte doit pouvoir traduire graphiquement l'implantation zonale de l'espace et la caractéristique quantitative des données. La cartographie de ces données doit ensuite aider le géographe et les étudiants à comprendre l'organisation de l'espace. Les questions suivantes résument le triple objectif de l'efficacité de ce sujet cartographique et composent le tableau de la figure 5 :

- Q1 : Est-ce que les signes graphiques couvrent toute la géométrie de l'implantation zonale ?

- Q2 : Est-ce que les signes graphiques permettent une perception des quantités et de leurs proportions ?

- Q3 : Est-ce que la structuration de l'espace est perçue ?

Aucune solution ne répond idéalement aux trois questions et toutes convertissent la localisation de la population à un point ou un semis de points. Si les semis de points décrivent mieux la surface d'une zone qu'un seul point situé sur le centroïde, la composante visuelle reste ponctuelle. La quantité détermine la taille, le nombre de points ou les deux à la fois. Seule la méthode des signes proportionnels réussit à créer une perception de quantité grâce à la variation de leur taille. Les deux suivantes créent en définitive une perception similaire à une variable visuelle de valeur, puisque la quantité de couleur (le noir ici) est plus ou moins importante dans chaque zone. La perception globale de leur masse qui devrait s'accompagner de celle des proportions entre les zones, n'est donc pas immédiate. La perception de ces proportions et de la géographie de l'espace montrent la difficulté de superposer deux dimensions dans une même représentation.

Cette difficulté se retrouve aussi dans les résultats de la troisième question, que les cartographes contournent grâce à certaines astuces et habitudes. Par exemple les cornets pour les espaces trop denses pour la méthode des points égaux sont des solutions possibles, mais en créant une perception potentiellement biaisée. Ces concentrations géographiques amènent plus souvent à réaliser des cartons, qui doivent suivre quelques règles élémentaires pour ne pas créer de ruptures dans la perception de l'espace, comme le montre la figure 6 : les deux premières cartes rompent respectivement la perception de l'information thématique (fig. 6a) et la continuité de l'espace cartographié (fig. 6b). Le chevauchement de cercles proportionnels est une situation très courante qui est admise puisque l'œil recrée la partie du cercle masquée. Elle convient à la cartographie, même si elle ne permet pas une perception de la continuité de l'espace représenté : pour M. Baron (Baron *et al.,* 2008) décrivant une solution cartographique des pôles universitaires multipliant les cartons, « l'image d'ensemble se perd en une vision très morcelée ».

Des auteurs admettent l'imperfection de ces différentes méthodes, comme par exemple C. Cauvin, F. Escobar et A. Serradj (2007, p. 44) qui résument la situation en ces termes : « Variable quantitative et variation de taille sont ainsi incompatibles ». Ils constatent que la variation de la taille affectée à une zone « implique […] une modification de surface de l'unité spatiale […] provoquant en conséquence une anamorphose. » Cette solution cartographique, évoquée par J. Bertin mais immédiatement écartée (1967), est aujourd'hui envisageable techniquement et proposée explicitement par A. Le Fur (2007), comme la seule capable d'exprimer une variation de taille pour l'implantation zonale. Cette position s'inscrit dans l'esprit de la *Sémiologie graphique*, puisqu'à la variation de la taille d'un point ou de l'épaisseur d'une ligne, elle fait correspondre la variation de la taille d'une zone

Cette première partie permet d'éclairer la problématique graphique de la représentation de quantités brutes attachées à des surfaces et de légitimer le choix sémiologique tout en prenant conscience que les modes de représentation présentés sont perfectibles. En réponse à ces imperfections, les cartogrammes doivent offrir la possibilité d'avoir une dimension non topographique tout en gardant la continuité de ces surfaces. Ces deux paramètres forment la définition de l'espace décrit par un maillage zonal et une information quantitative. La construction de ces nouvelles dimensions de l'espace est possible grâce aux outils des SIG.

La construction du nouvel espace

Ce saut dans une nouvelle dimension recouvre la famille des anamorphoses et en particulier les

	Q1 – zonale ?	Q2 – proportions ?	Q3 – espace ?
Signes proportionnels	Non : point au centroïde	Oui	Oui, sauf risques récurrents de chevauchements ou de ruptures (carton)
Points égaux	Non : semis de points irréguliers	Non : densités	Oui, sauf risques récurrents de chevauchement ou d'agglomérats de points (cornets)
Points Bertin	Non : semis de points régulier	Proportions et densités	Oui, mais il y a des risques de chevauchements

Figure 5 : Effets visuels des solutions graphiques d'une information quantitative en implantation zonale

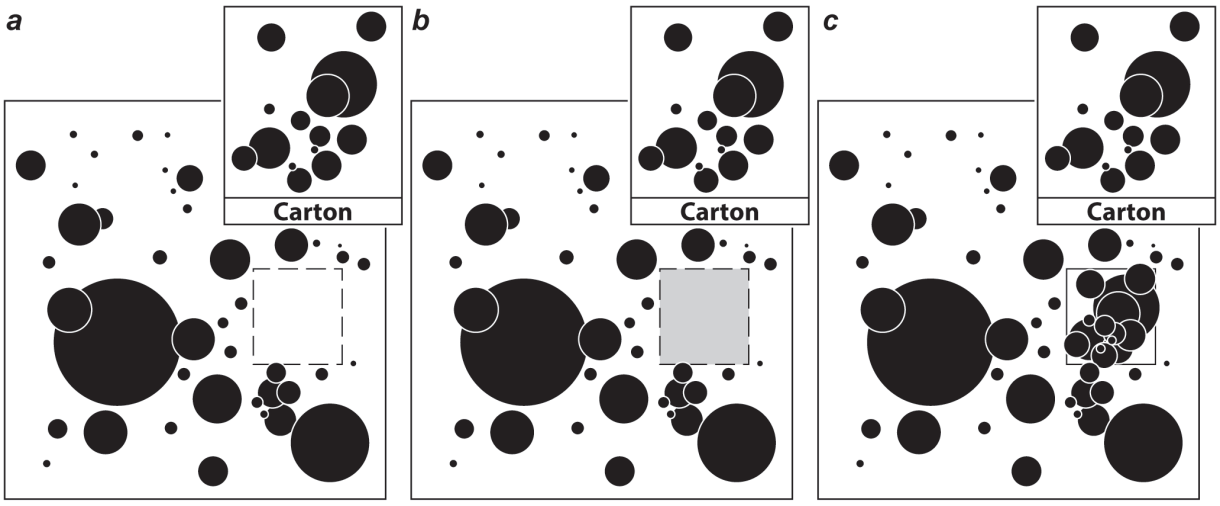

Figure 6 : L'espace dans un carton

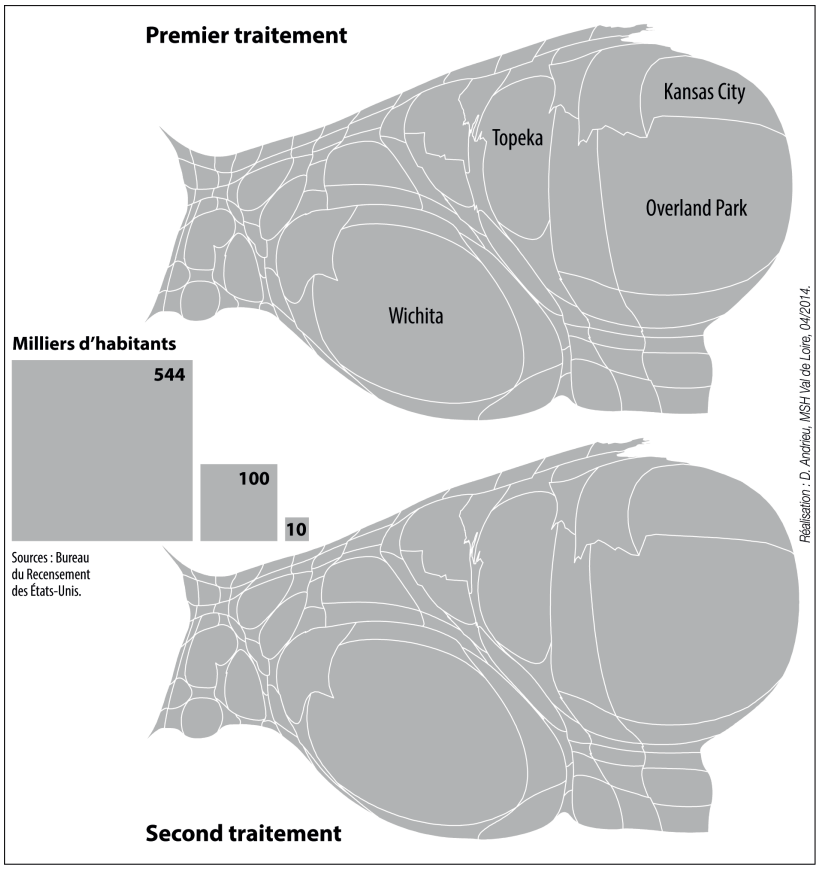

Figure 7 : Les deux étapes de transformation des comtés du Kansas en fonction de la population de 2010

cartogrammes qu'il convient maintenant de définir plus précisément. Il n'existe pas un type d'anamorphose mais bien plusieurs, rassemblés par C. Cauvin (1997) dans les « transformations cartographiques ». Les cartogrammes en constituent un type particulier : les « transformations cartographiques – de position – thématiques de poids ». Sous cet intitulé très détaillé et plutôt long, C. Cauvin, F. Escobar et A. Serradj (2008, p. 19-20) intègrent explicitement les cartogrammes qui forment « un groupe particulier de procédés cartographiques où la surface des unités spatiales varie en relation avec les valeurs thématiques du phénomène qui leur est associé.» W. Tobler prend une position plus ambitieuse en affirmant qu'un cartogramme est une projection cartographique (Tobler 2004) et légitime ainsi la voie à une exploration de la donnée spatiale par d'autres points de vue que celui de la métrique du terrain.

Si les premiers cartogrammes ont été produits bien avant l'avènement de l'informatique en géographie (Tobler, 2004), la géomatique permet aujourd'hui aisément son application en travaillant directement sur les formes originales des représentations de l'espace et non des formes géométriques. Cette démarche n'est pourtant pas sans risque pour la préservation de la topologie, seule propriété de l'espace pouvant garantir une représentation continue des surfaces. En effet, dans un maillage surfacique, la topologie décrit les contiguïtés des zones entre elle. Sans le nommer expressément, les auteurs relèvent le principal défaut de la construction des cartogrammes, comme R. Brunet (1987, p. 103) remarquant « quelques sacrifices » sur un cartogramme du Produit national brut de pays du monde, lorsque la Belgique devient voisine de la Suisse ou la Grèce de la Hongrie. Ces impacts sur l'espace sont employés pour séparer en deux familles les méthodes permettant d'obtenir des cartogrammes (Cauvin et al., 2008) : celles qui préservent les contiguïtés (Dougenik *et al.,* 1985 ; Gastner et Newman, 2004) et celles qui ne les préservent pas comme les solutions proposées par J. Olson ou D. Dorling (Cauvin *et al.,* 2008, p. 32-34). La position prise dans la première partie étant d'assurer la continuité de l'espace, la topologie doit être préservée. L'application *Scape Toad,* choisie pour ce travail permet de répondre à cette contrainte.

Enfin, plus par commodité que par conviction, on appellera la carte « classique » celle dont la métrique représente les mesures du terrain et de la topographie de l'espace. La manipulation d'outils SIG constitue l'essentiel de cette deuxième partie de la séquence de formation. Après avoir brièvement décrit *Scape Toad*, le déroulement de la transformation du fond de carte classique des comtés du Kansas est décrit. La topologie de ces nouvelles dimensions est ensuite évaluée, pour obtenir une surface de l'espace pouvant s'apparenter à un système de projection.

Scape Toad et les transformations cartographiques

Scape Toad est une application autonome développée en java dans le cadre d'une collaboration entre la Maison des sciences de l'homme du Val de Loire, l'École polytechnique fédérale de Lausanne et la société 91Nord (Andrieu *et al.*, 2007). Conçue sur le principe d'un assistant, l'application développe pas à pas toutes les étapes de la construction d'un cartogramme. La méthode de transformation employée par *Scape Toad* est celle de M. Gastner et M. Newman (2004). L'application accepte uniquement le *shapefile* comme format de fichier, composé de polygones attribués d'un champ numérique représentant la variable quantitative absolue. Elle traite ensuite les deux composantes de l'espace transformé dont la qualité est évaluée de la façon suivante :

- Changement d'unité de mesure : le cartogramme optimal est celui dont la proportion des surfaces des polygones est égale à celle définie par l'information statistique. Cette proportion est évaluée par l'application. Elle produit un rapport pour chaque polygone, exprimé en pourcentage, entre son aire théorique et l'aire effectivement produite par le traitement. À la fin du traitement, cet écart est cartographié et une série de paramètres statistiques (moyenne, médiane et quartiles) donne une évaluation globale des proportions produites. Si la qualité ne paraît pas satisfaisante, il est possible de transformer la couche issue du premier traitement afin de l'améliorer.

- Préservation de la topologie : à la différence de la méthode de transformation appliquée au début des années 2000 (Andrieu, 2005), celle de M. Gastner et M. Newman (2004) génère très peu de d'erreurs. L'évaluation de la topologie n'est pas proposée par *Scape Toad*, et doit être pratiquée sur un logiciel de SIG. Arc GIS propose des fonctions de validation de propriétés de l'espace que les étudiants utilisent. Cette étape est un exercice intéressant pédagogiquement pour faire prendre conscience de l'existence de ces propriétés d'une part et des modes de corrections automatisés ou non qu'elle requiert d'autre part.

Les dimensions du Kansas

Après l'ouverture dans *Scape Toad* de la couche des comtés du Kansas avec leur population de 2010, la transformation s'effectue via un assistant qui guide l'utilisateur vers l'étape finale. La cinquième étape mérite une attention particulière car l'utilisateur règle la qualité de la transformation pour produire un cartogramme optimal. Le processus de transformation nécessite de déterminer quatre paramètres. Pour le Kansas si

le curseur est poussé au maximum de la qualité, les paramètres apparaissant dans les options avancées sont les suivants :

- *Grid layer* : cette grille optionnelle n'a aucune incidence sur le traitement, elle constitue l'une des trois couches produites par *Scape Toad* et offre une perception du résultat de la transformation.
- *First grid* : composée de rectangles affectés d'une quantité calculée en fonction de leur superposition aux comtés et de leur population, cette grille est employée pour transformer la couche. Dans notre cas, l'application affiche 200, qui est le nombre de lignes.
- *Second grid* : composée de carrés servant spécifiquement à la transformation de l'espace, cette grille propose uniquement 5 tailles et affiche 128. Dans notre cas, la valeur 1024, la grille la plus fine, a été employée.
- Le nombre d'itérations : la précédente grille peut être utilisée plusieurs fois au cours du traitement. Ce paramètre détermine le nombre de passages qui est fixé ici à 4.

Plus ces paramètres sont élevés plus la durée du traitement est élevée, mais bien meilleure sera la qualité du cartogramme. Cette qualité s'évalue avec les étudiants sous deux aspects, l'un grâce à la dernière fenêtre présentée par l'assistant et l'autre en analysant la topologie du nouveau maillage des comtés. Cette démarche est nécessaire pour les étudiants afin que cet outil ne soit pas perçu comme un jeu de « presse-bouton » mais comme une opération volontaire et maîtrisée.

Les nouveaux espaces

En fin de traitement, un nouveau champ attributaire est créé et calcule la part d'erreur de chaque surface produite. Il se compose de l'écart exprimé en pourcentage entre sa surface optimale et la surface effectivement créée. Si celui-ci est supérieur à 100%, alors le polygone est trop petit et devrait avoir la proportion exprimée par ce rapport. Inversement si le pourcentage est inférieur à 100%, alors le polygone est trop grand et devrait être réduit.

La figure 7 présente deux cartogrammes de la population des comtés du Kansas. Pour le premier, les options avancées décrites précédemment aboutissent à un résultat dont la moyenne de l'écart entre les surfaces produites et théoriques est de 88,7 % et la médiane de 91,8 %. Les proportions ont par conséquent une qualité légèrement inférieure à ce qu'elle devrait être pour obtenir une qualité optimale, c'est-à-dire proche de 100%. Un second passage est effectué avec les mêmes options et permet d'obtenir le second cartogramme de la figure 8 dont la moyenne des erreurs est de 98% et la médiane de 99,7%. Ces deux paramètres étant plus resserrés l'un de l'autre et proches de 100%, ils garantissent une meilleure proportion des surfaces pour le traitement. Les deux passages sont effectués en moins de dix minutes chacun. La différence visuelle perçue entre les deux cartogrammes n'est pas flagrante malgré l'amélioration statistique des surfaces produites : le second cartogramme crée des surfaces plus grandes pour les comtés très peuplés de l'est et des surfaces plus réduites au nord-ouest.

À la fin d'un traitement l'application affiche les couches suivantes :

- une grille de la déformation qui offre une autre perception des transformations,
- la « légende » avec trois carrés définissant l'échelle des proportions de surfaces produites,
- le cartogramme où une mesure de l'erreur est associée à chaque polygone.

La topologie

Cette cartographie de l'erreur illustre les tensions portées sur certains espaces où les contrastes de population sont très forts entre des comtés voisins. Il est donc utile d'observer comment sont respectées les contiguïtés de polygones où deux types d'erreurs peuvent se produire :

- la discontinuité (fig. 8a) : les ruptures entre deux polygones voisins créent une discontinuité non souhaitable sur l'espace,
- le chevauchement (fig. 8b) : il peut masquer une zone par rapport à l'autre et fausser la perception des surfaces.

Le modèle de transformation de M. Gastner et M. Newman évite au mieux ce type d'erreur expliqué dans l'assistant. La validation de la topologie avec les outils proposés par Arc GIS recense malgré tout 113 discontinuités et 97 chevauchements. Ce nombre important se réduit en ajustant la tolérance d'agrégat. Cette mesure permet à l'outil de fusionner les points entre eux lorsque la distance qui les sépare est inférieure à celle-ci. Sur cet État, la tolérance par défaut est de l'ordre du millimètre. En spécifiant une précision au décimètre près, la topologie n'a plus que 50 discontinuités et 46 chevauchements. Avec un mètre de précision, il reste 18 discontinuités et 19 chevauchements, avec une tolérance à 60 mètres, les erreurs disparaissent.

Si elles paraissent très nombreuses, ces erreurs sont relativisées par rapport à l'étendue du Kansas, rectangle de 660 par 335 km. Les surfaces peuvent être rapportées à la population : par exemple les surfaces cumulées de tous les chevauchements représentent au total 13 habitants du Kansas sur 2,85 millions. Ces erreurs sont la conséquence de précisions de calcul lors

de la transformation du maillage par les grilles pendant le traitement. Si elles ne devaient pas être réduites par la solution automatique de la tolérance d'agrégat, des outils de corrections manuelles existent et peuvent être appliqués au cas par cas par les étudiants. En effet, des configurations spatiales très contrastées occasionnent malgré tout des erreurs, notamment avec des maillages très fins où, par exemple en France, la variation de population entre des communes peut être très forte.

La transformation simultanée : vers un système de projection ?

La construction des cartogrammes montre l'importance de la préservation de la continuité de l'espace créé. La topologie n'est pas qu'une contrainte, mais aussi un atout car elle crée les conditions favorables à l'interprétation des nouvelles dimensions de l'espace et de ses spécificités. L'assistant de *Scape Toad* conforte cette position en proposant la transformation simultanée de différentes couches. Cette option adapte au changement d'unité de mesure, une ou plusieurs couches géographiques calées par le système de projection sur le maillage de l'espace. La figure 9 illustre ce résultat par la transformation du réseau routier en fonction de la nouvelle taille des comtés. La forme du réseau, dont la topologie est préservée, prend alors les dimensions des comtés : dans le cas présent, les connexions des lignes formant le réseau ne créent aucune rupture.

Cette adaptation d'une couche à un maillage de l'espace à transformer peut s'apparenter à un système de projection particulier où l'unité de mesure n'est plus le mètre, mais le nombre d'habitants comme actuellement. Dans *Scape Toad*, cette opération est dépendante de la transformation du maillage et ne peut pas être créée *a posteriori*. La grille utilisée par la transformation pourrait être employée pour effectuer une « projection » à la volée de toute autre couche sur les dimensions du cartogramme, mais cette option n'est pas développée à ce jour.

Ainsi la géomatique apporte une aide indispensable à la réalisation du traitement où, quel que soit l'utilisateur, la transformation sera identique. Cette caractéristique est effectivement importante car J. Bertin (1967) pointait l'impossibilité de s'adapter aux nouvelles dimensions de l'espace si les mêmes données traitées par différents cartographes n'aboutissaient pas à la même image, ce qui était le cas lorsque ces représentations étaient construites manuellement. Les outils et les traitements présentés dans cette étape de la séquence de formation permettent d'avoir une démarche rigoureuse et reproductible tout en restant attentif à la vérification des résultats. À ce stade, l'apprentissage de l'interprétation géographique de ces nouvelles formes s'avère nécessaire et constitue la prochaine étape de la séquence.

Lire les cartogrammes : défricher de nouveaux espaces

La première interprétation attendue est de répondre au traitement sémiologique d'une information quantitative en implantation zonale. La variation des tailles s'applique sur la totalité des surfaces des zones et crée bien un effet visuel de quantité à l'instar des cercles proportionnels qui adoptent le même changement d'unité de mesure. À l'inverse de ces mêmes cercles employés pour l'implantation zonale, les surfaces ne se chevauchent pas. Ces représentations sont fondamentalement une réponse au traitement sémiologique des informations quantitatives brutes.

La seconde interprétation est géographique et nécessite de dépasser la perception d'une image déroutante que renvoie le cartogramme, voire douloureuse pour paraphraser Ph. Pinchemel (1987, p. 47) qui a « mal à la France » en regardant une anamorphose représentant les clubs de rugby, éditée dans le premier numéro de *Mappemonde* par C. Cauvin, J. Hirsch, H. Reymond et A. Serradj (1986). Plus récemment, l'équipe de rédaction de cette même revue (Eckert et al., 2008) cosignait un article critique des travaux du site *Worldmapper* et de ses très nombreux cartogrammes appliquant diverses variables statistiques aux pays du monde. La rédaction regrettait la seule fonction de communication motivant les choix cartographiques de *Worldmapper*. La présentation faite par A. Barford dans le même numéro de la revue avoue effectivement que ces « cartes montrent ce que l'on sait déjà » à propos des inégalités mondiales indiquées par les cartogrammes de façon « suggestive » où « leur forme permet une communication rapide » (Barford, 2008).

Il s'agit en effet de formes « suggestives » qui invitent tout autant à la découverte du territoire qu'une carte topographique. Le Kansas (fig. 8 et fig. 9) dont les limites des comtés ne reflètent aucune configuration géographique particulière excepté dans le nord-ouest de l'État où elles bordent le Missouri et la Kansas River, prend des formes arrondies très étendues, donc très peuplées dans ce cartogramme. Parce qu'au-delà de sa fonction de communication, le cartogramme, comme la carte plus généralement, doit avoir une fonction de « révélateur de structures sous-jacentes » (Cauvin, 1997) et être un « outil exploratoire » (Zanin, Lambert, 2012, p.33 ; Banos, 2001). Grâce au cartogramme, on découvre cet État et ses comtés peuplés et urbains que sont Wichita ou l'agglomération de Kansas-city, ou les comtés agricoles du Middle-West moins peuplés dont le plus petit représente 1 200 habitants.

Ces formes ne sont pas neutres. Pour C. Cauvin, F. Escobar et A. Serradj (2008, p. 18) reprenant l'hypothèse de W. d'Arcy Thompson, « la forme

exprime la structure d´un phénomène ; si l´on est à même de caractériser une forme ou de comparer des formes, alors on peut révéler par l´intermédiaire de la forme une structure non visible, on peut comparer des structures entre elles.» Il est nécessaire d'apprendre à lire ces formes et à comprendre ainsi ce qu'elles apportent à la connaissance de l'espace géographique. Elles expriment une réalité géographique dont il faut avoir conscience pour ensuite entrer dans un système de dimension de l'espace.

Lire les formes de l'espace

En adoptant une posture d'explorateur, ces formes permettent de découvrir les dimensions de nos sociétés urbaines. La première forme qui nous déroute est la forme globale de l'espace, puis celle des entités spatiales. Il est intéressant d'observer comment une même région est différente suivant que la transformation s'applique à la région *stricto-sensu* ou à un ensemble plus vaste. Le cartographe représente souvent son territoire d'étude sous la forme d'une île, déconnectée de ses voisins et de son environnement immédiat. Sur une carte classique, ce choix ne se pose pas avec autant d'importance qu'avec les cartogrammes. Ainsi, si nous revenons en France, la forme globale du cartogramme de la population communale de la région Centre n'est pas la même lorsqu'elle est traitée seule ou dans le territoire métropolitain. Transformée seule (fig. 10a : transformation indépendante), elle montre une forme compacte globalement reconnaissable à sa forme classique, alors qu'extraite d'un cartogramme du territoire national (fig. 10b : transformation dépendante), sa forme montre le poids de sa puissante voisine septentrionale et sa forte dépendance fonctionnelle à celle-ci.

Ces formes deviennent une information à part entière, comme celles des communes dans une carte classique, qui nous parlent de leur géographie (Bertin, 1967) vis-à-vis des fleuves, des montagnes et de l'histoire. Il en va de même des formes d'un cartogramme de la population communale (fig. 11) qui représente graphiquement les définitions des différents types de communes composant une aire urbaine :

- Les pôles forment ces masses circulaires de grandes surfaces, c'est-à-dire de communes peuplées, qui agglomèrent les fonctions urbaines centrales. À un rang inférieur, les moyennes et petites villes prennent cette forme circulaire massive mais moins étendue, c'est-à-dire moins peuplée.
- Les couronnes périurbaines : très étirées et bien moins peuplées que les précédentes, elles entourent les pôles indiquant leur dépendance au centre urbain.
- Les communes multipolarisées : leurs surfaces moins étirées, plutôt de petite taille, sont entre deux ou plusieurs aires urbaines.

La nouvelle dimension rend sensible, le concept de couronne, de pôle ou d'espaces multipolarisés par des formes évocatrices qui matérialisent la notion géographique de gradient urbain (Lévy, 2010). Suivant la finesse du maillage de l'espace, ces formes sont plus ou moins contrastées à l'image d'une carte choroplèthe réalisée sur les communes présentant plus d'informations qu'une carte choroplèthe par département.

Quelle que soit la forme du maillage et de l'information représentée, la lecture des cartogrammes nécessite un apprentissage à l'instar des cartes topographiques dont le commentaire est enseigné aux étudiants. Cette phase de la formation est indispensable à la compréhension de l'espace géographique représenté. Plus que les formes déroutantes du cartogramme, il est nécessaire d'admettre que le terrain et ses dimensions topographiques ne sont plus les seules à pouvoir représenter la population, sa répartition spatiale et ses composantes sociales.

Le constat d'une cartographie du vide

Les dimensions du cartogramme de la population sont plus adaptées à la représentation d'une réalité géographique d'aujourd'hui, celle de la très forte concentration humaine des villes, qui s'oppose aux très faibles densités des espaces ruraux ou extra-urbains. En France métropolitaine, 1% des surfaces communales concentre 22,9 % de la population en 2010. Inversement 76% des surfaces communales les moins peuplées, représentent 22,9% de la population totale. Ces valeurs portées sur la carte classique de la figure 12 montrent ces étendues des communes peu denses où vivent 12,5 millions d'habitants alors que 14,3 millions d'habitants sont présents sur 1% des surfaces. Par conséquence, nos cartes donnent à voir les espaces « vides » et masquent les espaces « pleins ». En préservant la proportion de ces surfaces, le cartogramme rend visibles les cœurs des villes avec leurs différentes formes (fig. 11) qui renferment une grande richesse géographique et sociétale (Lévy, 2010 ; Andrieu, 2010). P. Peltre (2005, p. 27), dans l'emploi des cartogrammes des pays du monde, mentionne ce défaut de nos cartes classiques par la sur-représentation visuelle des très grands pays pouvant « donner des impressions fausses ».

L'enjeu de la cartographie actuelle est d'adapter autant que possible nos représentations à cette réalité afin de percevoir toutes les dimensions qui composent nos espaces. Les cartogrammes acquièrent par conséquent une légitimité géographique. À l'image de la cartographie d'une information ordinale sur les surfaces des cercles proportionnels, le cartogramme

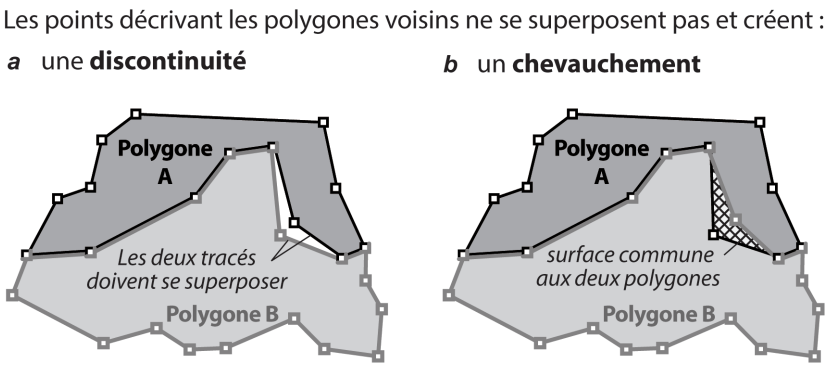

Figure 8 : Les erreurs de topologie de deux polygones contigus

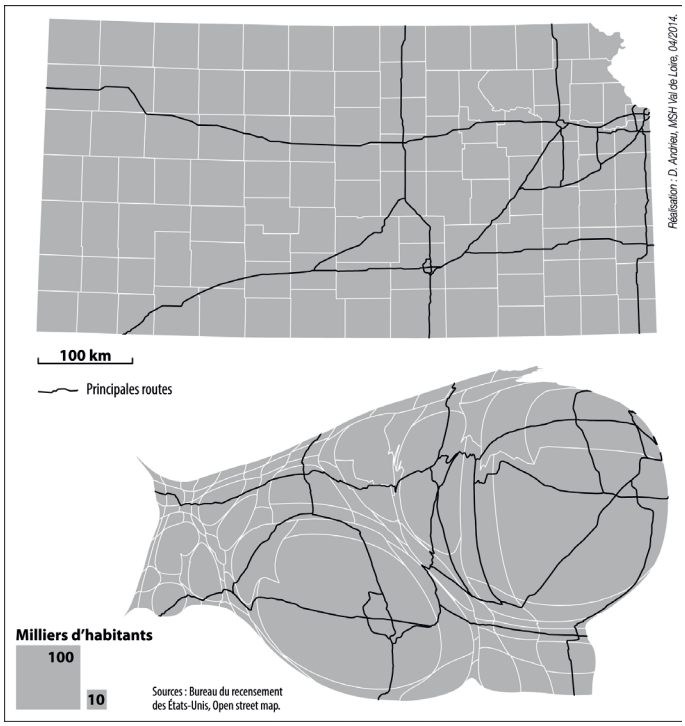

Figure 9 : Transformation des routes en fonction du cartogramme de la population de 2010 des comtés du Kansas

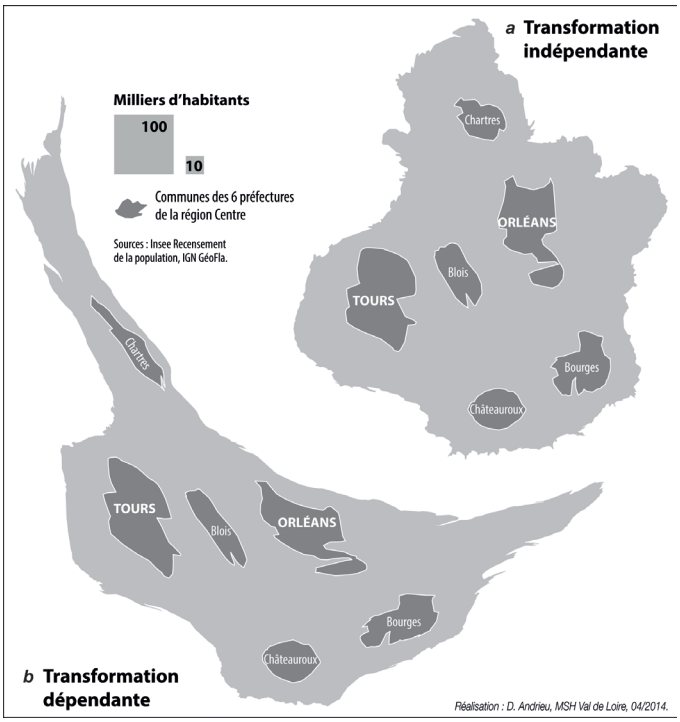

Figure 10 : Les formes du cartogramme de la population de la région Centre en 2010

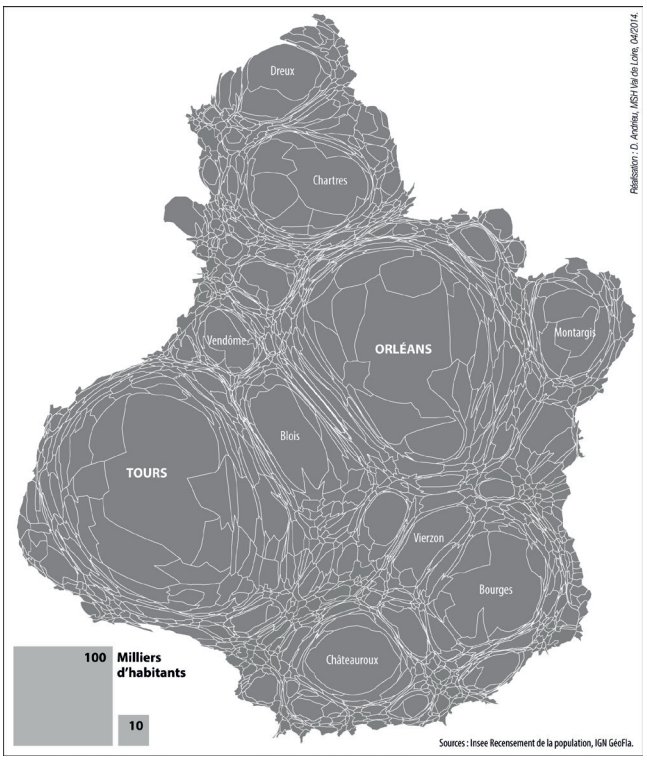

Figure 11 : Le maillage communal de la population de la région Centre en 2010

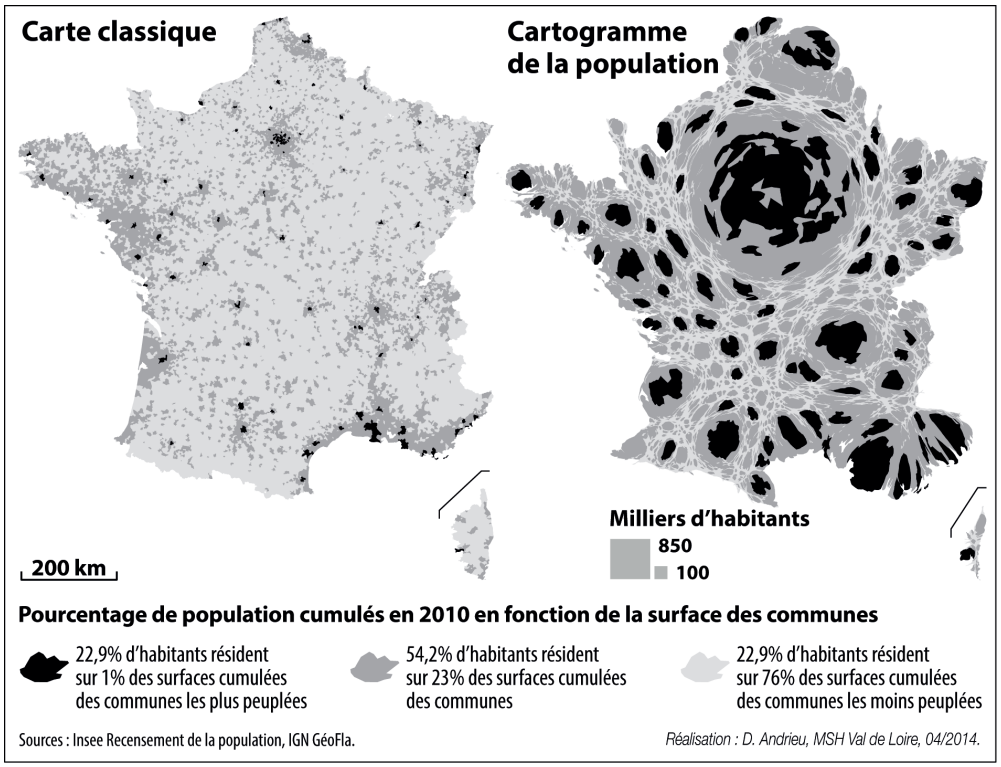

Figure 12 : Deux dimensions pour représenter la population - exemple des communes françaises

de la population devient un fond de carte de référence pour la représentation d'une information en rapport avec ses dimensions.

En effet, la dimension de ce nouveau maillage de l'espace peut être employée comme un fond de carte, permettant une appropriation facilitée de ses formes par les étudiants. Ainsi, de retour au Kansas pour poursuivre la découverte de cet espace, la figure 13 présente une cartographie de l'évolution de la population sur un fond de carte classique et sur le cartogramme. Les valeurs des évolutions ou de tout autre pourcentage sont plus élevées dans les régions de faibles effectifs. Les évolutions d'une région peu dense sont donc surreprésentées sur une carte classique alors que le cartogramme les module en fonction des surfaces de population. Ainsi, l'effet visuel sur les comtés faiblement peuplés, où les évolutions peuvent présenter facilement des valeurs extrêmes, est relativisé par la surface. Le nord-ouest du Kansas présente de fortes baisses de population sur la carte classique, alors que le cartogramme les modère par la surface des effectifs sur lesquelles les évolutions se rapportent. À l'inverse, les grandes surfaces du cartogramme présentant des fortes augmentations (Wichita, la banlieue de Kansas City ou certaines petites villes du sud-ouest) sont des évolutions statistiquement importantes car elles s'appliquent sur des grands effectifs de population.

Ainsi, sur le cartogramme il est plus facile d'observer les forts accroissements de population des comtés urbains et centraux. À l'exception du comté comprenant Kansas city et quelques autres villes moyennes, où les comtés perdent jusqu'à 1% d'habitants en 20 ans, le Kansas montre une accentuation de la concentration urbaine de la population alors que les comtés faiblement peuplés, éloignés des grandes villes ou en périphérie, perdent des habitants. Ces observations sont impossibles à faire sur la carte sans une connaissance préalable de l'espace. Elles montrent que l'information cartographiée sur un fond de carte ainsi transformé invite plus aisément à la compréhension et à la découverte de nouvelles structures spatiales. Par exemple, l'expérience avec un groupe d'étudiants de cinquième année de l'École polytechnique universitaire de Tours travaillant sur la Roumanie était révélatrice. Ne connaissant pas ce pays, les cartogrammes construits sur leur zone d'études ont été l'occasion d'une première découverte du territoire et de sa structure spatiale. À l'inverse, les cartogrammes sur la France créent des réactions plus contrastées et partagées chez les étudiants. Ces représentations renouvellent les perceptions de l'espace mais elles restent adaptées à l'exploration des territoires et peuvent être aussi employées comme un système de projection.

Vers un système de projection

En appliquant aux périmètres des zones inondables du bassin versant de la Loire, l'option de la transformation simultanée décrite dans le paragraphe 2, le traitement transforme cette couche d'information en fonction de la population des Iris. Le cartogramme de la population qui en résulte, crée une perception de cet aléa naturel face aux enjeux humains (Dumont, 2010). Cette solution montre les enjeux que représente le milieu urbain à l'échelle du bassin sur la seule figure 14. Observé du point de vue de l'aléa, elle donne à certains affluents modestes et quasiment imperceptibles sur une carte classique, toute leur importance à l'échelle du bassin versant : on pourrait noter ainsi le Furan, torrent descendant des monts du Pilat, ou les affluents de l'Allier comme la Tiretaine et l'Artière dont l'aléa de crue rapide traverse respectivement les agglomérations de Saint-Étienne et Clermont-Ferrand. Si localement ces situations sont connues, leur importance est ici mise en perspective dans le bassin versant, comme peut l'être l'aléa qui pèse sur la Loire moyenne d'Orléans à Tours puis Angers.

La distance décrite par le nombre d'habitants prend alors une consistance géographique grâce à un système de localisation spécifique. Elle structure l'espace en montrant en premier les objets géographiques importants que sont les villes. Ce sont ces objets qui construisent aussi nos représentations personnelles et constituent une trame de lieux connus de tous les Français (ou au moins des géographes !) : à l'échelle de la métropole française, nous nous situons par rapport aux grandes villes, comme Paris, Lyon, Marseille ou Nantes, qui sont mises en avant par le cartogramme de la population. Le cartogramme de la population n'est peut-être pas si éloigné que cela de nos représentations mentales et certainement plus facile à aborder que les dimensions formées par d'autres thématiques plus pointues, comme toutes celles présentées sur le site *Worldmapper*. L'intérêt des cartogrammes est moins dans les formes produites, même si nous avons montré leur rôle dans l'interprétation, que dans la dimension géographique que le territoire peu prendre. Cette dimension manque aux très nombreux cartogrammes proposés par *Worldmapper*. Par exemple le nombre de décès par empoisonnement accidentel, une des nombreuses variables statistiques présentées sur le site *Worldmapper*, aurait plus de légitimité à être cartographié sur un cartogramme adapté à cette variable : le nombre de décès par mort violente (le commentaire rapprochant cet indicateur du nombre de meurtres et de suicides), le nombre total de décès ou le nombre d'habitants. Le nombre d'habitants est un effectif qui s'adapte à de très nombreuses variables statistiques en sciences humaines. Elle n'est bien évidemment pas la seule mobilisable pour la cartographie tant que les dimensions du

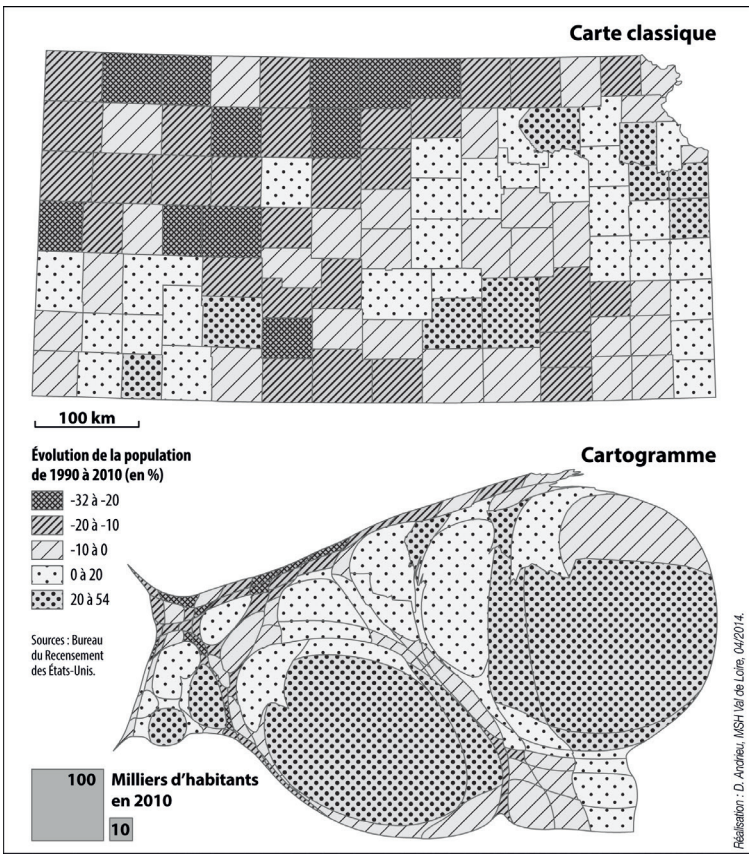

Figure 13 : Évolution de la population des comtés du Kansas de 1990

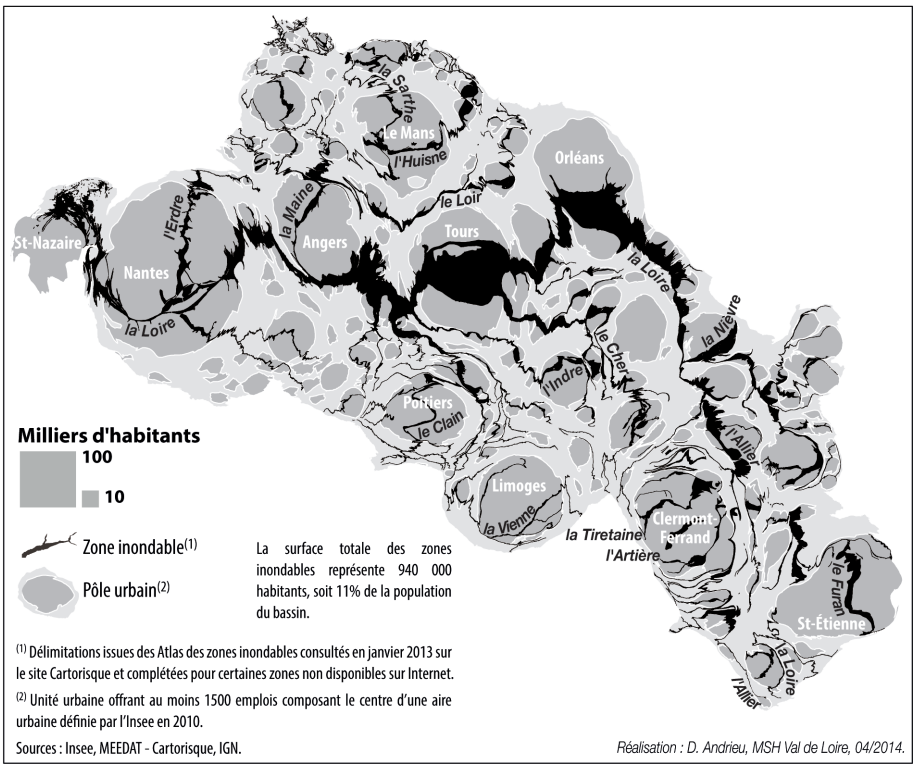

Figure 14 : Cartogramme des zones inondables sur le bassin de la Loire en 2009

cartogramme permettent de découvrir et comprendre l'espace géographique.

Conclusion

Ainsi, à partir d'une interrogation portant sur la sémiologie graphique, clé de voûte de la représentation cartographique, cette séquence de formation développe une problématique cartographique, traitée par la géomatique pour aboutir au final à la découverte de territoires où sont abordés des thèmes géographiques actuels : le risque d'inondation a été présenté, mais d'autres sujets pourraient être analysés. La relation entre des choix sémiologiques et la connaissance géographique transmise par la carte est étroite, d'où l'importance de préciser les choix sémiologiques, spatiaux, et de valider la chaîne de production de la carte. Il est donc tout à fait possible de parler de sémiologie graphique dans un enseignement employant les techniques numériques d'aujourd'hui. En présentant son rôle et son importance dans le message cartographique et la connaissance géographique, la sémiologie graphique est ici replacée à l'origine de la démarche.

Parce que la sémiologie employée par les cartographes a été édictée alors que les SIG n'existaient pas, son évolution est aujourd'hui nécessaire et ne se limite pas à l'énoncé de simples règles graphiques intangibles. Une relation entre la géomatique et la sémiologie permet d'avoir une posture critique sur les solutions cartographiques des logiciels. Cette séquence participe à son niveau à combler le manque décrit par F. de Blomac (2008) sur la formation qu'elle juge utile pour produire des cartes efficaces avec les SIG.

Le cartogramme et plus généralement la carte devient un moyen de réflexion (Zanin, Lambert, 2012). Le débat soulevé dans la revue en ligne *Mappemonde* autour de *Worldmapper* le prouve car il enrichit la cartographie contemporaine et doit faire évoluer la sémiologie.

Bibliographie

Andrieu D., 2010, « Le cartogramme : une autre dimension de l'espace urbain », dans Cailly L., Vanier M., dir, *La France. Une géographie urbaine*, Paris, Éd. Armand Colin (Collection U), p. 70-73.

Andrieu D., 2005, « L'intérêt de l'usage des cartogrammes : l'exemple de la cartographie de l'élection présidentielle française de 2002 », *M@ppemonde*, n°77 (1-2005), consulté le 16 avril 2014 : http://mappemonde.mgm.fr/num5/articles/art05105.html

Andrieu D., C.Kaiser, A.Ourednik, J.Lévy, 2007, "Advanced cartogram construction using a constraint based framework", Dublin, *GeoComputation Conference Proceedings*, consulté le 16 avril 2014 : http://www.geocomputation.org/2007/6A-Geovisualisation_and_Geovisual_Analytics/6A1.pdf

Banos A., 2001, « À propos de l'analyse spatiale exploratoire des données », *Cybergeo : European Journal of Geography*, Systèmes, Modélisation, Géostatistiques, document 197, consulté le 16 avril 2014 : http://cybergeo.revues.org/4056

Barford A., 2008, « Worldmapper, des centaines de cartes du monde sur Internet », *M@ppemonde*, n°89 (1-2008), consulté le 16 avril 2014 : http://mappemonde.mgm.fr/num17/articles/art08105.html

Baron M., Zanin C., Le Neindre C., 2008, « Mettre en cartes les universités du Bassin parisien », *M@ppemonde*, n°92 (4-2008), consulté le 16 avril 2014 : http://mappemonde.mgm.fr/num20/articles/art08401.html

Béguin M., Pumain D., 2000, *La représentation des données géographiques*, Paris, Éd. Armand Colin (collection Cursus).

Bertin J., 1967, *Sémiologie graphique*, Paris, Éd. Gauthiers-Villars.

Blin E., Bord J.-P., 1995, *Initiation géo-graphique ou comment visualiser son information*, Paris, Éd. SEDES.

Bord J.-P., 2012, *L'univers des cartes : la carte et le cartographe*, Paris, Éd. Belin (Collection Mappemonde).

Brunet R., 1987, *La carte, mode d'emploi*, Paris Montpellier, Éd. Fayard Reclus.

Cauvin C., 1997, « Au sujet des transformations cartographiques de position », *Cybergeo : European Journal of Geography*, Cartographie, Imagerie, SIG, document 15, consulté le 17 avril 2014 : http://cybergeo.revues.org/5385

Cauvin C., Escobar F., Serradj A., 2007, *Cartographie thématique / 2, Des transformations incontournables*, Traité IGAT, information géographique et aménagement du territoire, Paris, Éd. Hermes Science Lavoisier.

Cauvin C., Escobar F., Serradj A., 2008, *Cartographie thématique / 4 Des transformations renouvelées*, Traité IGAT, information géographique et aménagement du territoire. Paris, Éd. Hermes Science Lavoisier.

Cauvin C., Hirsch J., Reymond H., Serradj A., 1986, « Ballon rond et ballon ovale en France », *M@ppemonde*, n°86/0, p. 6.

De Blomac F., 2008, « Peut-on encore parler de sémiologie graphique ? », *SIG la Lettre*, n° 93, p. 4-8.

Dougenik, J. A, Chrisman, N. R. and Niemeyer D. R., 1985, « An algorithm to construct continuous cartograms», *Professional Geographer*, 37, p.75-81.

Dumont M., 2010, « Les villes françaises à l'épreuve des nouveaux enjeux environnementaux », dans Cailly L., Vanier M., dir, *La France. Une géographie urbaine*, Paris, Éd. Armand Colin (Collection U), p. 289-304.

Eckert D., Fontanabona J., Jégou L., Robert S., Sillère G., 2008, « Le site Worldmapper. Commentaire sur l'article d'Anna Barford », *M@ppemonde*, n°89(1-2008), consulté le 16 avril 2014 : http://mappemonde.mgm.fr/num17/articles/art08106.html

Gastner M.T., Newman M.E.J., 2004, « Diffusion-based method for producing density-equalizing maps », *PNAS Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 101, n° 20, p. 7499 – 7504, consulté le 17 avril 2014 : http://www.pnas.org/content/101/20/7499.abstract

Jégou L., 2008, « J . Bertin en 1966 : le semis régulier de symboles proportionnels, méthode d'avenir. », *Le petit blog cartographique* : http://www.geotests.net/blog/article/j-bertin-en-1966-le-semis-regulier-de-symboles-proportionnels-methode-davenir

Le Fur A., 2007, *Pratiques de la cartographie*, Paris, 2e éd., Éd. Armand Colin (Collection 128).

Lévy J., 2010, « Un nouvel espace français », dans Cailly L., Vanier M., dir, *La France. Une géographie urbaine*, Paris, Éd. Armand Colin (Collection U), p. 55-74.

Pinchemel Ph., 1987, « Carto-humeur, carto-humour – Pitié pour la France », *M@ppemonde*, n°87/1, p. 47.

Salachas J. D., Bord J.-P., 2012, « La sémiologie graphique aujourd'hui : quelles transmissions de l'héritage vivant de Jacques Bertin ? », *Bulletin du Comité français de cartographie*, n°212, p.21-24, consulté le 16 avril 2014, http://www.lecfc.fr/new/articles/212-article-3.pdf

Tobler W., 2004, « Thirty Five Years of Computer Cartograms », *Annals of the Association of American Geographers*, vol. 94, n° 1, p. 58-73, consulté le 17 avril 2014 : http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1467-8306.2004.09401004.x/full

Zanin C., Lambert N., 2012, « La multireprésentation cartographique - Exemple de l'Atlas interactif des régions Européennes », *Bulletin du Comité français de cartographie*, n°213, p.39-64, consulté le 21 avril 2014, http://www.lecfc.fr/new/articles/212-article-3.pdf

Zanin C., Trémélo M.-L., 2003, *Savoir faire une carte*, Paris, Éd. Belin (Collection Belin Sup).