



HAL
open science

Cartogrammes, anamorphoses : des territoires transformés

Anne-Christine Bronner

► **To cite this version:**

Anne-Christine Bronner. Cartogrammes, anamorphoses : des territoires transformés. Traitements et cartographie de l'information géographique, ISTE Group, pp.231-271, 2023, Encyclopédie SCIENCES : Géographie et démographie. Thème Cartographie, 9781789481617. <10.51926/ISTE.9161.ch7>. <hal-04791858>

HAL Id: hal-04791858

<https://hal.science/hal-04791858v1>

Submitted on 19 Nov 2024

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.



HAL Authorization

Cartogrammes, anamorphoses : des territoires transformés

Anne-Christine Bronner

*SAGE Sociétés, acteurs, gouvernement en Europe
CNRS - Université de Strasbourg, France*

7.1. Introduction

Les anamorphoses tiennent une place particulière dans le traitement cartographique des données localisées ; les aborder permet de questionner les formes de l'espace géographique, du territoire que l'on représente, du fond de carte. Le passage du géoïde terrestre à une représentation « à plat », en deux dimensions, va *de facto* créer des formes différentes et, en ce sens, toute carte une anamorphose.

Le fond de carte s'élabore en lien avec les jeux de données, les traitements mathématiques, statistiques, graphiques et cartographiques, ainsi que les objectifs de la carte. Les positions et les formes des objets localisés, qu'ils soient figurés par des points, lignes ou surfaces, sont déterminées par différentes opérations comme la géolocalisation ou le géoréférencement, la sélection, la généralisation ou la simplification, le changement de base spatiale, etc. Cet ancrage spatial est référencé sous la forme d'une série de coordonnées géographiques XY. L'anamorphose se différencie au sein des traitements cartographiques par une spécificité : sur une anamorphose, l'espace dit « géographique », planimétrique s'estompe, se modifie au profit du thème représenté, révélant des phénomènes non observables directement. Sur un planisphère où l'emprise de chaque pays est calculée sur la base de sa population, la surface de la Chine sera quasi dix fois plus grande que celle de la Russie. Pour une femme d'affaires européenne¹, les distances entre métropoles

1. Pour éluder l'emploi de la règle de primauté du masculin et de l'écriture inclusive, nous faisons le choix d'alterner aléatoirement le genre masculin et féminin, laissant à la lectrice le

européennes et africaines se réduisent à quelques heures. Les mêmes lieux se reconfigurent différemment pour rendre compte de l'espace des migrants de l'Afrique subsaharienne.

Dans le système d'anamorphose, la position des localisations est définie par la variable attributaire $Z : X=f(Z), Y=g(Z)$. Il permet de se focaliser sur la réalité que l'on représente et s'appuie sur le lien spécifique entre localisations et variables attributaires. Ce lien apparaît dans de nombreux travaux du cartographe américain Waldo Tobler : les dimensions spatiale et thématique sont liées dans une (ou une succession de) transformation cartographique pour répondre aux usages, contextes de production et objectifs de la carte. La base spatiale se crée, se « calcule » en accord avec le thème représenté : angles fiables pour tracer un cap pour la navigation, surfaces terrestres précises pour le géomètre, centrage de la carte sur un lieu, prise en compte de la population pour analyser des résultats statistiques ou des distances entre les lieux pour aménager un territoire... (Tobler 1979).

Ce chapitre parlera d'*anamorphose* ou de *cartogramme* (voir encadré 7.1), deux termes qui semblent aujourd'hui devenus génériques et interchangeables, même si cette équivalence est très discutable, et renvoient aux deux types d'anamorphose les plus courants² :

– celles où les positions et formes des objets localisés sont déterminées par la valeur d'une variable attributaire attachée aux surfaces, par exemple la population qui impacte la taille et les contours d'unités administratives (associées parfois aux qualificatifs « scalaire », « de surface » ou « surfacique ») ;

– celles qui identifient les transformations qui reconfigurent le territoire en déplaçant les positions en fonction de distances entre les lieux, comme les temps d'accès (en général associé à « vectoriel », « de distance »).

L'une des clés (principale, voire nécessaire) pour éviter les confusions dans la construction et l'interprétation des anamorphoses cartographiques est la compréhension et l'accès aux méthodes mobilisées pour les construire. Dans ce chapitre, nous dressons un panorama consacré principalement aux différents types de cartogrammes qui résolvent la question de la cartographie d'une quantité brute par la variation de la surface des entités (7.2.), en les distinguant des anamorphoses de l'espace-temps (7.3.). Ce n'est qu'après avoir présenté cet éventail de procédés cartographiques que nous reviendrons sur des aspects transversaux en soulignant des

soin de comprendre que le genre utilisé doit être compris comme renvoyant aux deux genres.

2. Différents termes ou expressions coexistent : anamorphose, carte par anamorphose ou en anamorphose, représentation anamorphique, cartogramme ou anamorphose scalaire, de surface, surfacique, vectoriel, de distance, cartogramme continu, contigu... En anglais: *cartogram*, *area cartogram*, *equal density map*, *equal area map*, *isodemographic map*, *rubber map*, *anamorphic map*... Relevons que ces dénominations, selon les contextes, ciblent différentes méthodes et types de carte.

traits communs sur le plan méthodologique et en offrant quelques précisions quant à l'habillage et les difficultés de lecture de ces cartes (7.4.).

Le terme de *cartogramme* est associé au traitement graphique de données statistiques et a pu, et peut encore, être employé pour identifier tout type de visualisation d'une information statistique, comme des cartes diagrammes. Si le sens immédiat tend à renvoyer vers la représentation continue des masses par une variation proportionnelle de la surface (sens restreint), il s'étend *de facto* à un grand ensemble de procédés (carto)graphiques appliqués aux données localisées, parfois précisés dans une épithète : cartogramme de Dorling, cartogramme discontinu d'Olson, cartogramme vectoriel, *distance cartogram*, *tile cartogram*...

Le mot *anamorphose* est issu du grec *anamorphoûn* qui signifie « transformer », qui renvoie côté latin à *transformare*, de *trans*, et *formare* pour changement de forme. Ce terme va émerger en cartographie pour caractériser les cartes dont les tracés bousculent les formes « géographiques »³. Comme l'anamorphose en Art ou dans les arts graphiques, ces images interrogent les lectrices ou spectateurs, qu'elles soient issues ou non de procédés mathématiques. Nous pouvons évoquer notamment les effets de perspective ou optique (*anamorphic projection* ou *illusion*) où l'image varie en fonction de la position du regard (avec cette référence très connue du crâne du tableau *Les Ambassadeurs* d'Hans Holbein).

Encadré 7.1. À propos des termes cartogramme et anamorphose

Ce chapitre se concentre sur les principes des méthodes, sans aller dans les démonstrations mathématiques ou algorithmiques, qui sont par ailleurs détaillées dans les articles originaux. Les illustrations exploitent deux bases de données : des données électorales sur la région Grand Est pour éprouver les distorsions de l'espace géographique sur un espace peu connu, et les distances temps ferroviaire en 1980 à l'échelle de la France pour la question plus complexe de la représentation du temps. Les principaux logiciels utilisés sont précisés sur les cartes et cités en bibliographie.

7.2. Des cartogrammes pour représenter des quantités brutes associées à des entités surfaciques

Le principe de base du cartogramme dit « scalaire » est de composer, pour chaque entité, une surface proportionnelle à la valeur de la variable cartographiée. De ce principe de base résulte que le cartogramme se lit comme un *treemap*. Si une entité occupe un quart de la surface, elle contient le quart de l'effectif et le regroupement visuel de plusieurs entités permet de sommer très approximativement des effectifs ou d'évaluer la part relative de cet ensemble par rapport à la totalité. L'association quantité-surface est une règle tacite commune et reconnue dans le

3. En lieu et place d'autres termes possibles comme paramorphose, qui évoque la recomposition des atomes, ou métamorphose.

traitement graphique des données avec l’histogramme, le diagramme circulaire, ainsi que le *treemap* ou *mosaic plot* et le *bubble chart*, en vogue en *dataviz*. La dimension spatiale impose une contrainte supplémentaire : l’organisation des différents objets dans l’espace.

Pour exemplifier les méthodes, nous nous appuyerons sur la région du Grand Est de la France, dont la forme n’est pas nécessairement connue, nous permettant ainsi de mieux nous focaliser sur les aspects méthodologiques et les résultats cartographiques. Les traitements ont été réalisés avec le logiciel *R* et différents *packages* (Giraud et al. 2021 ; Jeworutzki et al. 2020), *ScapeToad* (Andrieu et al. 2008) et QGIS.

7.2.1. Pourquoi recourir aux cartogrammes ?

Les cartogrammes, dénomination utilisée ici dans un sens restreint – soit la variation « surface par valeur », *area-by-value cartogram or map* –, répondent à un double enjeu : résoudre le problème de la variation de taille en implantation surfacique et proposer un fond de carte adapté notamment pour la cartographie de variables socio-démographiques.

7.2.1.1. Résoudre le problème de la variation de taille en implantation surfacique

Dans son ouvrage de référence *La sémiologie graphique* (1973, p.71) [1^e éd. 1967], Bertin identifie un verrou dans l’utilisation de la variable visuelle taille : « En implantation zonale, la zone ne peut varier de surface dans le plan. (...) L’extension est limitée par la surface de la zone à qualifier. » Par défaut, la carte par cercles proportionnels et la carte par points (ou *dot map*) sont alors utilisées. À la même époque, Tobler émet l’idée de transformer le fond de carte et le formule ainsi :

*Imagine that one could stretch a geographical map so that areas with many people would appear large, and areas with few people would appear small. If such a map could be made one would expect all voting districts to be the same size for they should contain equal numbers of people.*⁴ (Tobler 1973).

2.1.2.2. Transformer le fond de la carte choroplèthe

La visibilité d’une variable attachée à chaque entité géographique sur une carte choroplèthe est liée à sa superficie, ce qui ne pose pas de problème quand nous

4. « Imagine(z) que l’on pourrait étirer une carte géographique de telle sorte que les zones très peuplées dessineraient de grandes surfaces et les zones peu peuplées des surfaces réduites. Si une telle carte pouvait être créée, on pourrait escompter que les circonscriptions électorales aient la même taille puisqu’elles sont fondées sur un nombre égal d’électeurs. »

cartographies un taux qui se réfère au monde du « visible », comme les informations qui se rapportent à l'occupation du sol (urbanisation, déforestation...), autrement dit, quand le dénominateur du taux est la surface de l'entité. Par contre, lorsque ce fond dit « classique » cartographie par aplat un taux qui concerne une population (typiquement lorsque l'on travaille sur des données socio-démographiques, électorales ou épidémiologiques), l'image soustrait sur le plan visuel ce qui se passe dans les localités administratives de faible superficie et surexpose le phénomène dans les unités de grande taille. Le biais est introduit par deux faits : (1) les petites unités spatiales d'un découpage territorial, en général administratif, ne sont pas les moins peuplées et inversement ; (2) un taux est sensible à la valeur du dénominateur (la valeur d'un ratio peut varier d'autant plus fortement que l'effectif est faible).

Ce déséquilibre est visible sur le graphique de concentration figure 7.1 : dans la région Grand Est, le quart de la superficie ne représente que 3 % de la population ; la moitié de la superficie de la région se compose de communes de moins de 400 hab., totalisant moins de 10 % de la population. Les 168 communes de plus de 5000 hab., soit la moitié de la population de la région, se concentrent sur 5 % du territoire.

On s'opposera à l'idée de réduire l'utilité du cartogramme à l'amélioration de la visibilité des petites unités administratives – la possibilité de créer des cartons existe pour les représentations statiques et l'affichage dynamique permet de zoomer instantanément sur chaque zone de l'espace cartographié – ou pour son côté « communicationnel ». Si leur intérêt ou leur difficulté de lecture restent un objet de discussion et leur usage non généralisé, on constate néanmoins un renouvellement régulier des algorithmes et de leur implantation dans des outils créés *ad hoc* (par exemple *ScapeToad* ou l'application en ligne *go-cart.io*), dans certains logiciels de cartographie (par exemple le logiciel en ligne *magrit.cnrs.fr*), sous forme de *plugins*, notamment dans des SIG, ou de scripts dans différents environnements (par exemple les packages *Cartogram* ou *cartogrammeR* dans *R*).

Carte choroplèthe et visibilité de l'information cartographiée

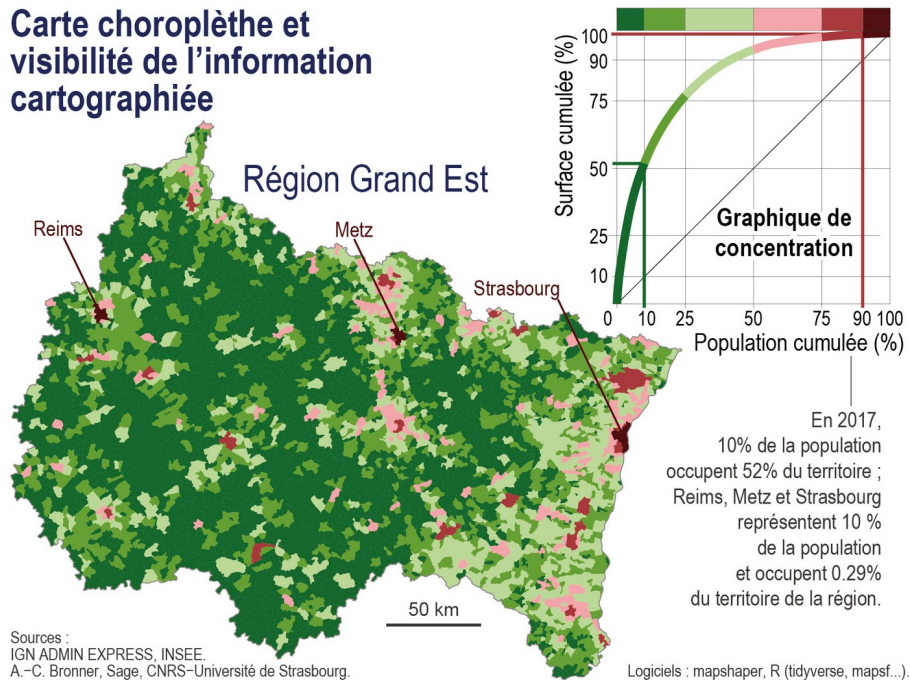


Figure 7.1. Carte choroplèthe et visibilité des informations cartographiées.
Région Grand Est, communes

Précisons que des traitements cartographiques apparentés aux cartogrammes ne seront pas instruits, car ils n'intègrent pas, *stricto sensu*, le système d'anamorphose :

- le cartogramme « non-contigu » d'Olson (1976). Réponse critique à la *rubber map* de W. Tobler (1973) qui produisait une représentation continue d'une variable discrète et un territoire peu reconnaissable, la proposition d'Olson apparaît comme une simple déclinaison du signe proportionnel, qui conserve la forme et l'ancrage géographique. Cette solution cartographique est très intéressante pour filer la métaphore d'un espace éclaté et inégalitaire, comme la cartographie de dimensions socio-politiques à l'échelle continentale ou mondiale ;

- les *tile grid maps* (ou autre combinaison des termes *tile*, *grid*, *map*, *cartogram*) prises ici au sens des productions de type *dataviz* où chaque entité spatiale est représenté par une forme géométrique de taille identique (carré, hexagone), quels que soient la superficie ou le poids thématique. Ces formes unitaires, agencées de façon à rappeler la forme globale du territoire, accueillent en général une information thématique qualitative ou quantitative traduite sous forme d'aplats ou autres combinaisons graphiques, voire des graphiques comme des histogrammes, des courbes... (chapitre 6, figure 6.7 ; Ribeca 2018) ;

– la cartographie d’un débordement de Lambert (2020) qui couple dans un nouveau procédé le principe de la dot map (un point égale une quantité fixe) et une fonction qui empêche le chevauchement des figurés, engendrant des variations de surface. Sous la forme d’une animation dynamique, la proposition visualise l’évolution des hospitalisations pendant la crise COVID (chapitre 6, figure 6.6a).

Devant la variété de l’offre, comme dans tout processus cartographique, il est nécessaire d’articuler le contexte, les objectifs de l’analyse et les caractéristiques du jeu de données source pour effectuer un choix éclairé entre différentes méthodes.

7.2.2. Des liens intrinsèques entre méthodes et données

Il est nécessaire de décrire les caractéristiques des données pour lesquelles le cartogramme peut être mobilisé.

– La donnée à cartographier est un effectif, une population, un dénombrement, un stock..., soit une variable quantitative discrète (échelle de rapport), additionnable, qui se traduit par convention par une variation de surface sur le plan graphique et cartographique. Si la variable est un ratio, on procédera alors en deux étapes : le calcul d’un cartogramme de surface sur la base des effectifs, puis le report du taux sur la base spatiale obtenue.

– Si l’on souhaite comparer différentes variables (résultats électoraux, diagnostics médicaux, variables sociales – richesse, niveau d’éducation... – ou démographiques), c’est généralement la population qui va constituer la base. Dans les autres cas, la variable du dénominateur crée la transformation : résultat d’une élection calculé sur les votes exprimés, taux d’abstention sur le nombre d’inscrits, taux de chômage sur la population active, part des déchets plastiques sur le total des déchets...

– Le principe de base des cartogrammes, calculer la surface en fonction d’une quantité, exclut *a priori* les jeux de données avec des valeurs nulles ou absentes qui identifient les zones non concernées par le phénomène étudié, en particulier pour le cartogramme continu.

7.2.3. Anatomie du cartogramme : les méthodes

Plusieurs solutions méthodologiques vont résoudre le problème de variation de taille en implantation surfacique : le cartogramme dit continu ou contigu⁵, qui redessine les limites territoriales et infra-territoriales, et une série de méthodes qui

5. Les deux qualificatifs existent : continu renvoyant à la déformation continue de l’espace et contigu à la préservation de la contiguïté (voire la propagation par contiguïté).

s'apparentent à un traitement graphique de la donnée géographique, tout en intégrant la dimension spatiale des entités cartographiées. Nous nous contentons ici d'exposer les principes et d'illustrer les différents types, tout en signalant que des travaux visent à recenser, classer, évaluer les méthodes (Bortins *et al.* 2002 ; Tobler 2004 ; Cauvin *et al.* 2008 ; Nusrat et Kobourov 2016 ; Nusrat *et al.* 2018 ; Markowska 2019). Nous verrons ainsi successivement le cartogramme continu, les cartogrammes de Dorling, de Demers, rectangulaire et en mosaïque.

7.2.3.1. Le cartogramme continu

Le cartogramme dit continu est issu d'un procédé itératif qui redistribue les surfaces des entités, redessine les limites jusqu'à atteindre la surface « thématique », déterminée par la proportion de la valeur cartographiée par rapport au total. Deux dénominations anglophones sont plus explicites : *area-by-value map*, *density-equalizing map projection*⁶.

Popularisé notamment par le projet *Worldmapper, the world as you've never seen it before*, le cartogramme continu se révèle opportun pour la cartographie des inégalités socio-spatiales, comme dans *The Social Atlas of Europe* (Ballas *et al.* 2014), ou en géographie électorale pour pointer les différences de comportements entre ville, périphérie et zone dites « rurales » ou entre régions. Ainsi sur la figure 7.2 représentant une élection qui oppose deux candidats lors du second tour des présidentielles 2017 dans la région Grand Est, les cantons urbains se distinguent de leur périphérie et plus globalement les deux départements situés à l'Est de la zone, plus peuplés et plus urbanisés se démarquent du reste du territoire.

6. La réalisation d'une *dot map* sur le fond de carte avant et après la transformation permet de comprendre le terme de *density-equalizing map projection*.

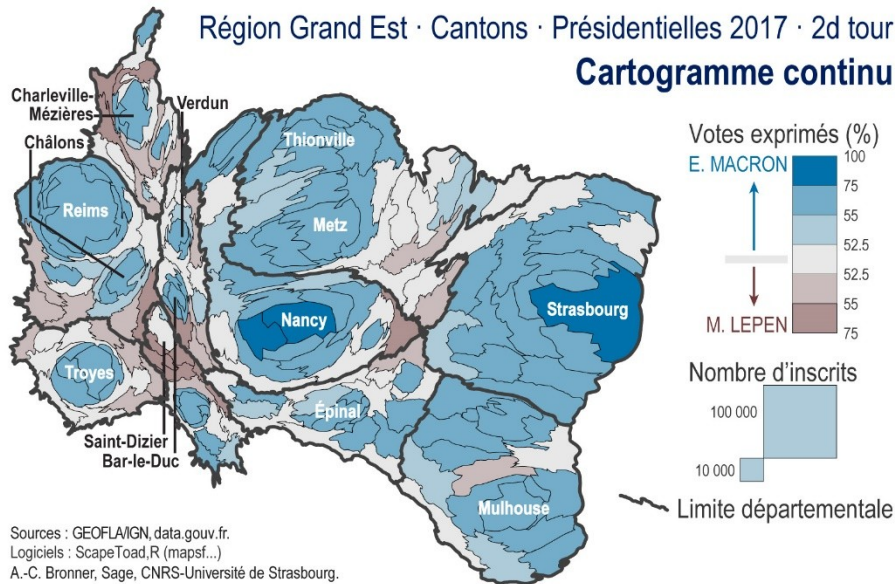


Figure 7.2. *Cartogramme continu*

7.2.3.1.1. De multiples algorithmes

Il est difficile de recenser l'ensemble des propositions méthodologiques qui de surcroît se renouvellent régulièrement (Sun 2020 ; Gastner *et al.* 2018 ; Sagar 2014 ; Henriques *et al.* 2009). Elles se mesurent à l'aune de leur efficacité : erreur de surface, reconnaissance des formes, respect de la topologie, facilité d'implémentation des équations, ressource en temps de calcul, ouverture du code... Les métaphores ou principes que l'on trouvera derrière les méthodes méritent, sans souci d'exhaustivité, d'être cités : la « feuille élastique » de Tobler (1973), Dougenik *et al.* (1985) ou Sun (2013), le principe des automates cellulaires de Dorling (1996), les ressorts de House et Kocmoud (1998), la transformation de Fourier pour les auteurs de CartoDraw (Keim *et al.* 2004), l'idée de densité et de diffusion pour Gastner et ses collaborateurs (2004 ; 2018) ou encore la référence aux projections pour Tobler (1986), Kadmon et Shlomi (1978), Selvin *et al.* (1984) ou Langlois (2003).

Les algorithmes les plus courants que l'on retrouve dans les outils de traitement des données sont ceux de Dougenik, Chrisman et Niemeyer (1985) et de Gastner et Newman ou Gastner, Seguy et Moore (2004 ; 2018)⁷. Les premiers auteurs utilisent l'idée de la feuille élastique (*rubber sheet*) que l'on étire localement : les points formant les tracés se déplacent selon une force pondérée par la distance. Les seconds

7. Ces trois méthodes sont réunies dans le package *cartogramR* (Cornillon, Demoraes 2021).

s'appuient sur l'idée d'une goutte d'encre qui se dissout jusqu'à être parfaitement répartie, ou de particules injectées dans une pellicule d'eau : l'objectif du modèle appliqué est d'aboutir à une probabilité constante de trouver une particule (*density-equalizing map projection* ou « égalisation de densité »). Les solutions algorithmiques de Gastner *et al.* produisent de meilleurs résultats, tant au niveau des surfaces que de la forme des entités transformées.

7.2.3.1.2. La mesure d'erreur

Quel que soit le procédé, une mesure d'erreur compare la surface « thématique » visée, théorique et la surface calculée par l'algorithme. Elle identifie les surfaces sur- ou sous-évaluées (pour le dire sommairement, les grandes régions initiales qui n'ont pas assez « rétréci » et les petites entités géographiques qui n'ont pas assez « gonflé »). Paramètres de tendance centrale et de dispersion sur cette mesure permettent d'analyser la qualité du cartogramme et de le valider.

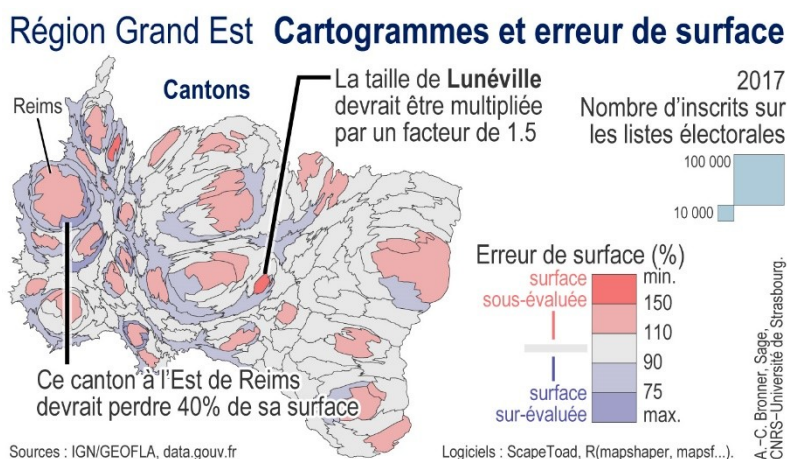
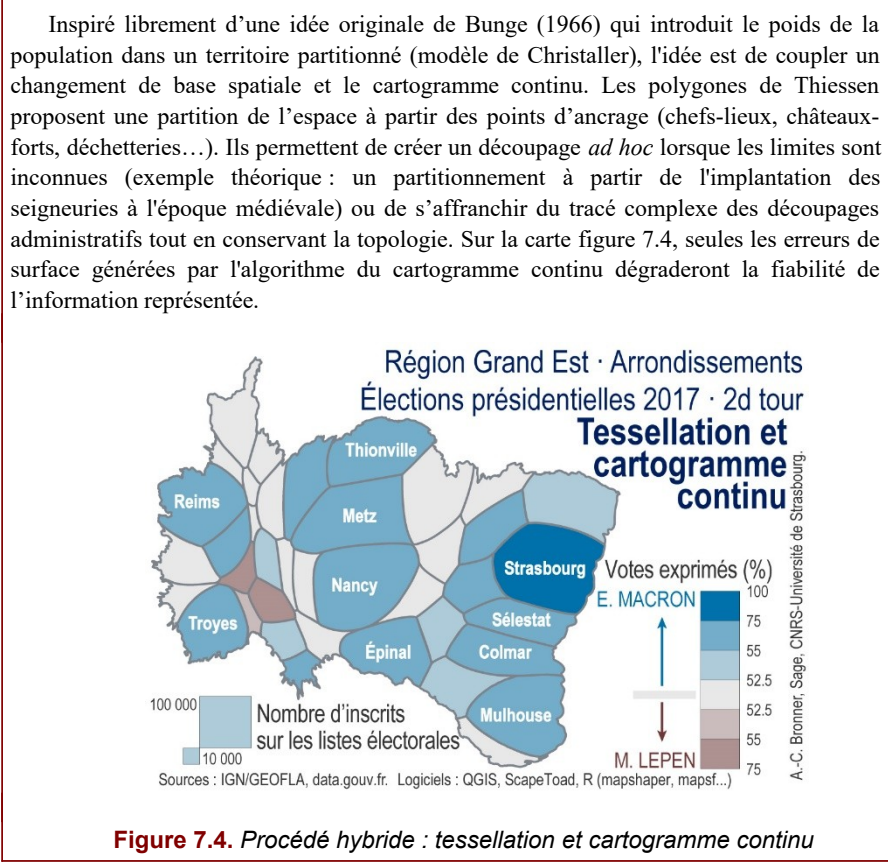


Figure 7.3. Cartogramme continu et erreur de surface

La carte des erreurs de surface (voir figure 7.3) permet de repérer les entités urbaines sous-évaluées et les cantons surévalués, aires où les effectifs sont faibles, ceci d'autant plus s'il s'agit d'espaces géographiques vastes au départ. Relancer le calcul après une première transformation contribue parfois à réduire le taux d'erreur. Mais ce dernier restera conséquent dans le cas de distributions fortement contrastées, lorsque l'on est en présence de valeurs extrêmes, que ce soit sur le plan spatial ou statistique. Lorsque l'on ne peut diminuer les erreurs de surface, nous conseillons de passer à un autre type de cartogramme (de Dorling, par exemple) ou de se contenter d'un traitement graphique de la donnée.

Lorsque le dessin des contours des entités n'a pas de lien direct avec la variable ou que les limites spatiales sont floues ou inconnues, nous proposons d'hybrider une tessellation et un algorithme du cartogramme continu (voir encadré 7.2).



Encadré 7.2. Cartogramme continu sur une partition de Voronoï (polygones de Thiessen)

Sans transition, intéressons-nous à l'impact des différents découpages administratifs sur l'analyse du phénomène cartographié.

7.2.3.1.2. Cartogramme continu et niveau d'agrégation

Qu'il s'agisse du fond de carte planimétrique ou transformé, il est intéressant d'observer les variations d'une variable pour différents niveaux administratifs, comme dans l'exemple de la région Grand Est (voir figure 7.5) : 1 région, 10 départements, 39 arrondissements, 198 cantons villes, 169 bassins de vie, 149 EPCI (établissement public de coopération intercommunale), 31 zones d'emploi, 5136

communes. Une granularité fine génère inmanquablement un problème de densité graphique qui brouille la lisibilité de l'information : dans le cas du cartogramme, cette surcharge cible des zones peu concernées par le phénomène représenté. L'échelle de l'arrondissement masque l'hétérogénéité des comportements entre les villes et le péri-urbain, gradient qui apparaît aux niveaux administratifs plus fins.

On notera que des découpages territoriaux qui paraissent proches sur le plan du nombre d'entités montrent des réalités différentes : le découpage électoral des 198 cantons fait émerger la métropole de Nancy et souligne une différence entre la ville de Saint-Dizier et les territoires qui l'entourent ; la carte des bassins de vie (définis en fonction de l'accès aux équipements) diffère de la carte des intercommunalités (EPCI), découpage qui visiblement associe des communes plus homogènes.

Le cartogramme continu n'est pas le seul qui tente de résoudre la question de la variation de la taille en implantation surfacique.

7.2.3.2. Les multiples formes du cartogramme

Aux côtés du cartogramme scalaire continu, différentes solutions cartographiques, énumérées figure 7.6, résolvent par la transformation des surfaces les variations d'une variable, à commencer par la proposition de Dorling (1996) qui réduit la forme de l'entité à un cercle, principe décliné sous la forme du carré avec le cartogramme de Demers. Ce dernier ne doit pas être confondu avec le cartogramme rectangulaire ou encore le cartogramme mosaïque.

Région Grand Est · Élections présidentielles 2017 · Second tour

Cartogramme continu et niveau d'agrégation

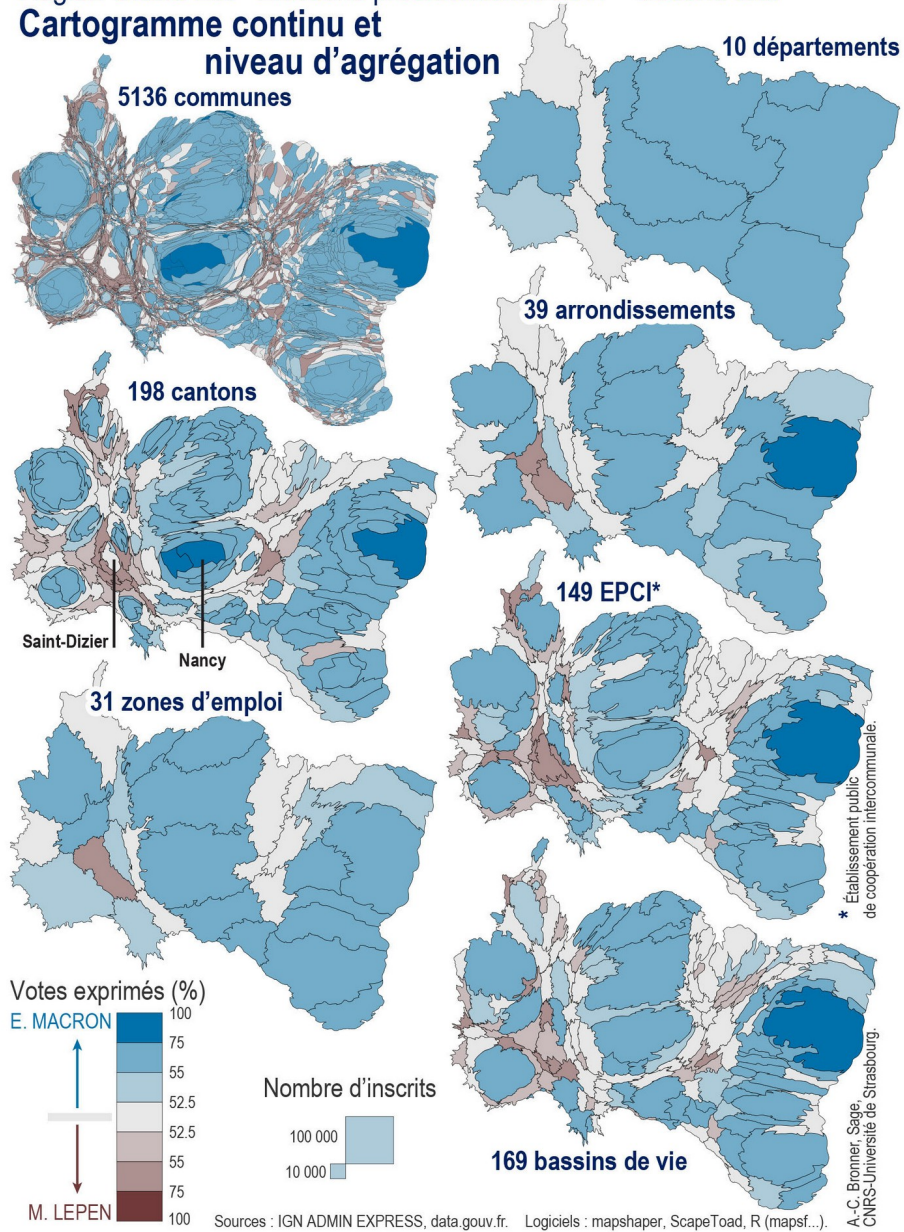


Figure 7.5. Cartogramme et niveau d'agrégation

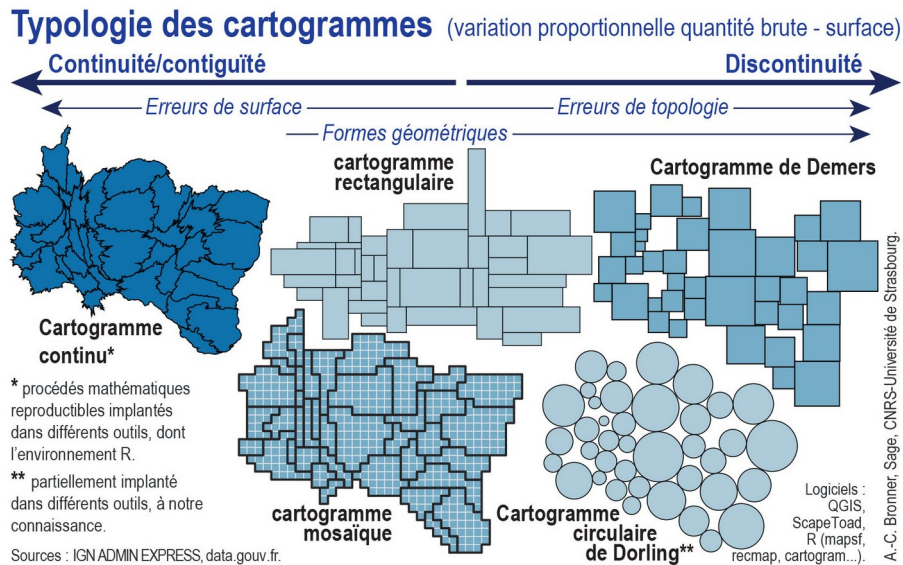


Figure 7.6. Typologie des cartogrammes

Les cartogrammes dits discontinus, qui présentent des surfaces strictement proportionnelles aux valeurs, sont aptes à représenter des jeux de données avec des valeurs absentes ou nulles (par la disparition des entités non concernées par le phénomène). Cependant, ils génèrent des erreurs de topologie plus ou moins conséquentes.

7.2.3.2.1. Le cartogramme circulaire de Dorling...

Dorling présente dans sa thèse (1991) et l'ouvrage *Area Cartograms : Their Use and Creation*, (1996), entre autres traitements cartographiques innovants, deux procédés pour faire varier la surface d'une entité proportionnellement à une valeur quantitative thématique, l'un fondé sur les automates cellulaires, l'autre qu'il nomme *circular cartogram*. Ce second procédé est identifié comme le cartogramme de Dorling et qualifié de très simple et attractif (Nusrat *et al.* 2018 ; Bortins *et al.* 2002), le cercle apparaissant comme une représentation familière, du fait de son utilisation dans les cartes par cercles proportionnels. Les unités spatiales sont transformées en cercles proportionnels à l'effectif représenté qui vont s'organiser en combinant *forces d'attraction et de répulsion*. L'avantage de la méthode est de produire des surfaces thématiques « justes », mais au détriment de la forme des contours géographiques⁸ et de la topologie. Pour certaines formes de territoire,

8. L'idée est de pousser ici au maximum le principe de simplification des tracés : « *If, for instance, it is desirable that areas on a map have boundaries which are as simple as possible, why not draw the areas as simple shapes in the first place? Here an algorithm is described*

notamment celle de la Grande-Bretagne sur laquelle Dorling a beaucoup expérimenté le procédé, l'Europe ou le monde, l'arrangement des masses offre une image généralement pertinente et lisible. Pour une bonne analyse de la représentation, une visualisation numérique permet d'afficher au survol les toponymes des lieux représentés.

Sur la figure 7.7, l'application – partielle⁹ – de cette méthode à l'échelle de l'arrondissement sur la région Grand Est dessine un agrégat de cercles où la cohérence spatiale apparaît avec l'alignement Thionville, Metz, Nancy, Épinal et les positions de Charleville-Mézières, Reims et Troyes ou Strasbourg. Quelle que soit la performance de l'algorithme et le paramétrage, le procédé bouleverse ici les positions relatives et les contiguïtés, erreurs que nous avons tenté de recenser. Briey et Saverne sont particulièrement malmenés dans cet espace thématique.

7.2.3.2.2. ... et les carrés de Demers

Le cartogramme de Demers peut apparaître comme une variante du cartogramme circulaire de Dorling, que l'on peut associer à la référence historique des cartogrammes de l'Europe de Pierre Émile Levasseur, citée notamment par Tobler (2004). Cette solution cartographique nous paraît peu intéressante : l'automatisation du procédé est complexe (Nickel *et al.* 2019) et la forme carrée provoque des erreurs de topologie multiples et de nombreux vides. Pour l'illustrer (voir figure 7.8), nous avons opté pour une création manuelle après avoir réalisé une carte par carrés proportionnels. Impossible pour Verdun de conserver un voisinage avec les 6 arrondissements qui l'entourent.

which does just that, using circles as the simplest of all shapes » (Dorling 1996, p.32).

9. Dans plusieurs outils (*Packages packcircles* ou *cartogram* de R, blog.datawrapperr.de/cartograms/, observablehq.com/collection/@joewdavies/dorling-cartograms), il semble qu'il existe une confusion entre la fonction *non-overlapping* prévenant la superposition des figurés et le cartogramme de Dorling. Les cartogrammes produits présentent des vides (parfois très importants) entre les cercles, liés à l'absence de la fonction d'attraction.

Région Grand Est · Arrondissements · Élections présidentielles 2017 · 2d tour
Cartogramme circulaire *alias* cartogramme de Dorling

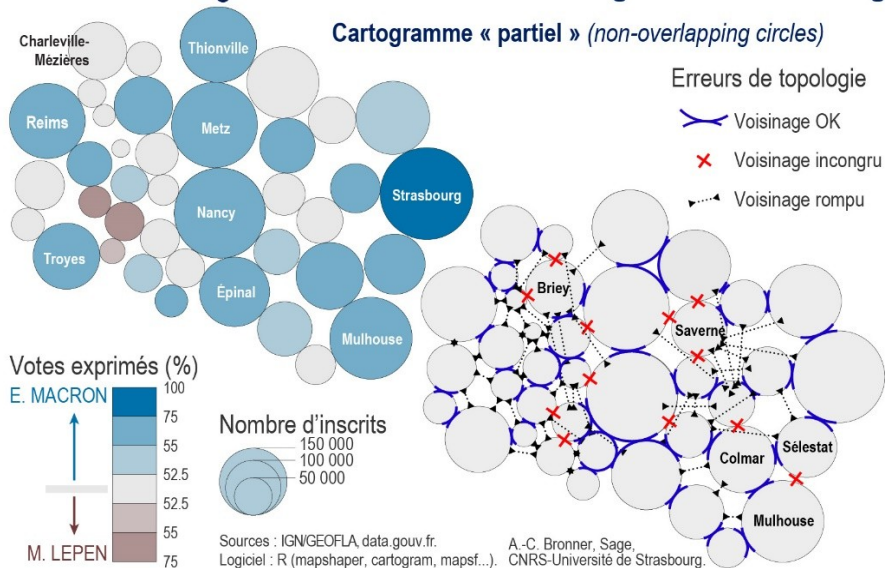


Figure 7.7. Cartogramme circulaire *alias* cartogramme de Dorling

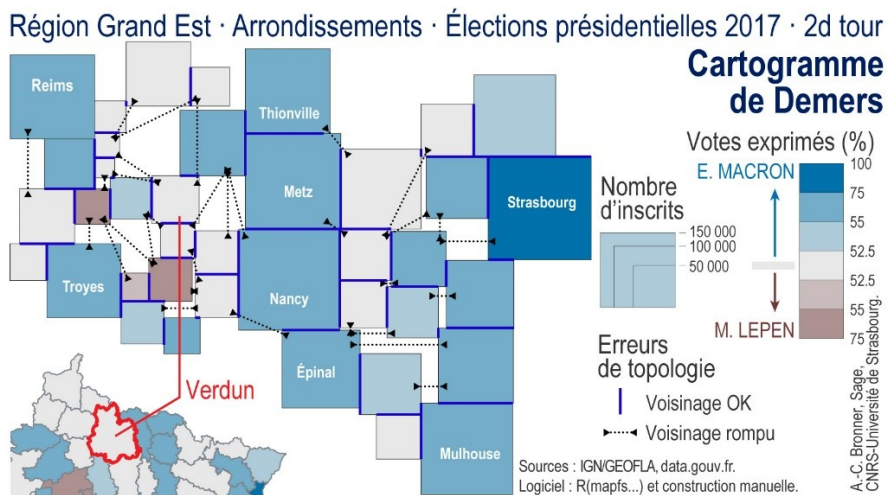


Figure 7.8. Cartogramme de Demers

La forme rectangulaire, un peu plus souple, peut être une solution notamment lorsque les entités géographiques possèdent des frontières rectilignes, comme les états des États-Unis ou certains découpages urbains.

7.2.3.2.3. Le cartogramme rectangulaire

Le rectangle (voir figure 7.9) permet de renouer avec l'apparence des cartogrammes réalisés à la main à l'aide d'un papier quadrillé ou la référence historique classique de la carte de la population des États-Unis de Raisz (Raisz 1934). Son automatisation est une véritable gageure : les possibilités de jeux multiples sur les variations hauteur-largeur tout en respectant les surfaces permettent de maintenir la majorité des relations topologiques (Heilmann *et al.* 2004 ; van Kreveld, Speckmann 2007).

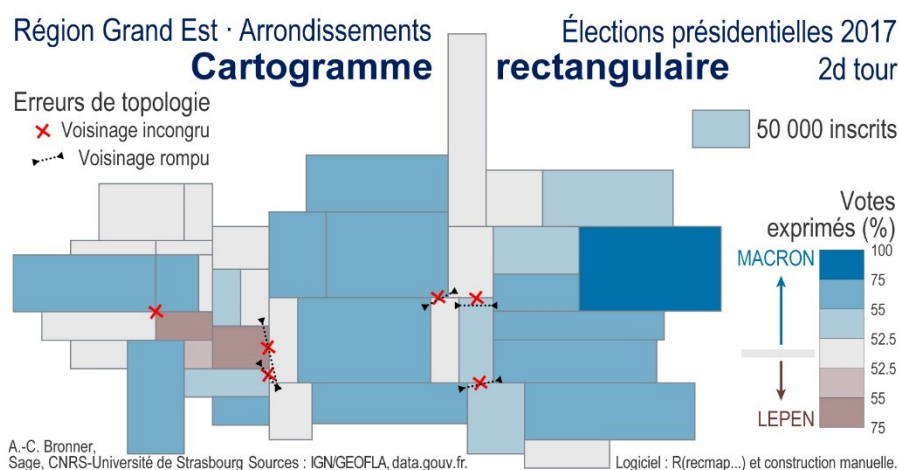


Figure 7.9. Cartogramme rectangulaire

7.2.3.2.4. Le cartogramme mosaïque

Nous utiliserons l'appellation de cartogramme mosaïque, d'après *mosaic cartogram*, (Cano et al. 2015) pour le type de cartogramme qui s'apparente au principe du signe répété : une surface géométrique unitaire (carré, hexagone) est associée à une valeur de référence (voir figure 7.10). Le pavage permet ensuite de reconstruire les entités en assemblant le nombre de dalles nécessaires. Ce procédé ne doit pas être confondu avec le carroyage. Ces cartogrammes peuvent minimiser les erreurs de topologie, de surface, de forme ; ils permettent d'effectuer un comptage et proposent une « esthétique » séduisante, comme ce cartogramme de la population mondiale où chaque maille représente 1 million de personnes (Roser 2018) ou

l'application en ligne *Tilegrams* (Pitch Interactive) qui met en œuvre ce procédé pour quelques territoires et variables thématiques.

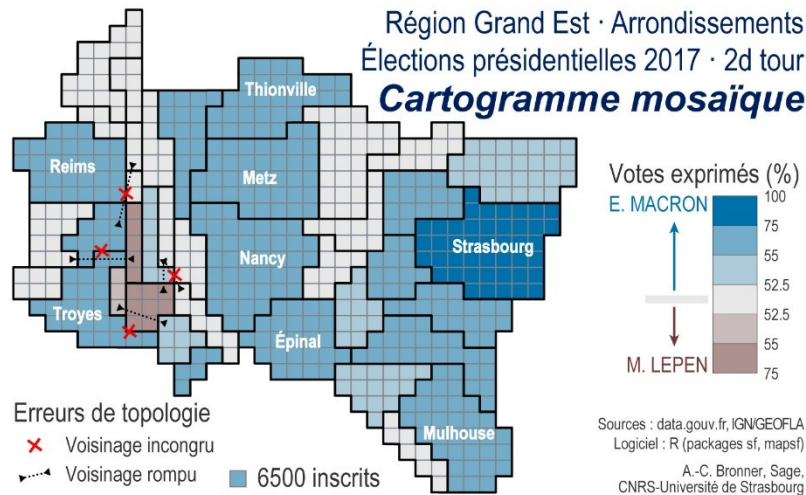


Figure 7.10. *Cartogramme mosaïque*

Si l'ensemble des procédés que nous venons de voir sont pensés pour représenter des effectifs associés à des surfaces, il existe une solution cartographique qui permet de transformer l'espace à partir de données de type taux, ratio : la carte piézoplèthe.

7.2.4. La carte piézoplèthe pour représenter des taux associés à des entités surfaciques

La *carte piézoplèthe* est le résultat d'une transformation cartographique conçue en 1979 par Schneider (Cauvin, Schneider 1989), calculé par le logiciel *Anaplaste*, (2011). Ce transfert de modèle du génie civil assimile le territoire cartographié à une fine plaque de béton, sur laquelle des forces (les valeurs de la variable) vont s'exercer provoquant une dilatation ou une contraction du matériau. Attention : à la différence du cartogramme continu (surface proportionnelle à l'effectif), *la transformation traduit les écarts à un paramètre de tendance centrale* (moyenne ou médiane). Plus l'écart est important, plus la surface se dilatera ou se contractera. L'intérêt de la carte piézoplèthe réside dans la possibilité de transformer une variable de type ratio en une forme cartographique. Sur un territoire donné, au lieu de comparer une série de cartes par aplats, on cherchera les ressemblances entre les formes, comme sur la figure 7.11 entre la population des cadres et le vote pour Emmanuel Macron en 2017.

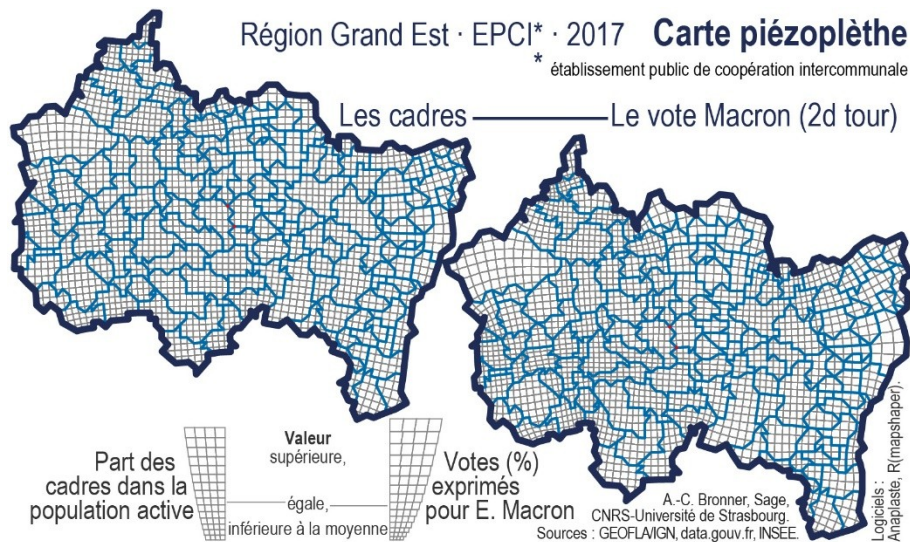


Figure 7.11. Carte piézoplèthe

Ainsi, tels les systèmes de projection qui ne peuvent à la fois conserver angle, forme et surface lorsqu'ils mettent à plat l'ellipsoïde terrestre, un cartogramme peut difficilement respecter à la fois la proportion des surfaces, la topologie et les formes des territoires. Ces méthodes, à sélectionner rigoureusement en fonction des jeux de données et des objectifs, offrent plusieurs lectures d'un territoire. À la base, elles permettent un simple déchiffrement des masses, puis dans le cadre de comparaison, entre différents niveaux d'agrégation ou thèmes, c'est la lecture des formes qui permet d'analyser les inégalités de répartition : par exemple un cartogramme de la population *versus* un cartogramme des richesses. Enfin, c'est la possibilité de construire un fond de carte adapté au phénomène représenté, le choix de commuter la surface au sol en une surface thématique de référence, notamment pour cartographier des phénomènes sociaux, environnementaux, sanitaires...

Une seconde série de transformations cartographiques s'attache à révéler les distances entre les lieux. Nous nous concentrerons plus particulièrement sur la représentation cartographique des distances temps, petite contribution à la complexité du traitement et de la cartographie de phénomènes temporels (voir chapitre 6).

7.3. L'anamorphose pour la représentation de l'espace-temps

Le monde dans lequel nous vivons est un monde extrêmement mobile, où femmes et hommes, marchandises, espèces du monde animal, végétal, virus, etc.

circulent. Si les lieux sont généralement ancrés spatialement, leurs positions peuvent également être définies au sein de ces circulations en termes de proximités et d'éloignements, par les relations qui les lient, par leurs jonctions. La représentation par anamorphose dite vectorielle est une réponse possible parmi d'autres pour la visualisation de ces liens, de cet espace relationnel, fonctionnel, pratiqué, vécu, imaginé... L'anamorphose la plus courante est celle de l'espace-temps, configuration où les distances « géographiques » s'effacent pour laisser place aux temps de parcours entre les lieux¹⁰. Ces cartes émergent dans les années 1990 avec notamment les travaux de Cauvin et son équipe strasbourgeoise¹¹ (Cauvin, Raymond 1987 ; Cauvin 2005) et de Spiekermann et Wegener (1993).

Ces images cartographiques trouvent leur place en géographie des transports ou dans les recherches autour des mobilités. Les déplacements intègrent *de facto* une dimension temporelle (les algorithmes de recherche d'itinéraire ciblent souvent l'optimisation du temps de trajet). Représenter le temps permet de caractériser, d'analyser et de comparer des réseaux, existants ou simulés, des pratiques et des représentations spatiales, de révéler des inégalités territoriales, de contribuer à la compréhension des mouvements et des relations entre les lieux.

Nous faisons ici l'impasse sur le cadre théorique et les hypothèses de recherche qui sous-tendent le type d'espace-temps étudié¹² et la mesure de la distance, ainsi que les différentes analyses statistiques descriptives et cartes que l'on peut effectuer à partir d'une matrice de distances. Comme toute base de données, le recueil ou l'utilisation de distances fiables dans l'espace et dans le temps et cohérente sur le plan thématique reflète une série de choix qui doivent être clairement énoncés dans les sources. L'éclairage des choix de collecte et une compréhension minimale de la chaîne méthodologique sont indispensables pour analyser, interpréter et communiquer les résultats.

Précisons que d'autres types de distances thématiques peuvent être analysées (coût, sociale...) : à partir du moment où cette mesure est quantitative, la matrice ou le vecteur origine-destination sont à même d'être traités par les propositions méthodologiques présentées ci-après. Contrairement aux cartogrammes vus dans la première partie de ce chapitre, traduction graphique relativement directe de la

10. D'autres dénominations comme *tempographic map*, *time map* ou chronotopes peuvent apparaître sans pour autant clairement identifier le type de représentation qu'ils désignent.

11. Recherches de Colette Cauvin ou sous sa direction, essentiellement dans le cadre de travaux de commande pour des institutions publiques (publiées sous forme de rapports ronéotés) et, ponctuellement, des cartes isolées réalisées à la demande, par exemple pour des atlas, la presse, des ouvrages scolaires...

12. Un espace « fonctionnel » où le temps de déplacement caractérise l'offre d'un réseau de transport ? Un temps simulé au sein d'un modèle théorique ou dans le cadre de propositions d'aménagement d'un réseau ? Un espace pratiqué, révélé par exemple par nos traces numériques ? Un espace « vécu », socio-cognitif, des distances estimées entre lieux ? ...

donnée (la variable visuelle taille traduit une quantité), les anamorphoses de distance articulent plusieurs méthodes qui varient selon que l'on s'intéresse

- d'une part, à l'accessibilité globale ou de système ou multipolaire qui prend en compte l'ensemble de la matrice et,

- d'autre part, à l'accessibilité locale ou de sous-système ou unipolaire qui repose sur un vecteur recueilli spécifiquement ou extrait d'une matrice (ligne ou colonne).

Dans les deux cas, la construction de l'anamorphose est effectuée par l'enchaînement de plusieurs méthodes (voir figure 7.12) :

- les premières cherchent à calculer une série de paires de coordonnées à partir de la valeur de la distance, soit par le déplacement des localisations en fonction de la distance à un lieu origine (méthode Isodist, voir 7.3.1.2.), soit par la réduction d'une matrice de distances en deux dimensions (méthodes MDS et apparentées, voir 7.3.2.1.) ;

- la seconde compare les positions en temps et les positions de référence (en général géographiques), comparaison matérialisée par des vecteurs de déplacement, résultats qui peuvent être étendus par interpolation à l'ensemble de la surface pour créer une anamorphose (méthode de la régression bidimensionnelle, voir encadré 7.3).

Les traitements ont été effectués avec la dernière version du logiciel *Darcy* (version 2.4.2, 2021), programmé en java en 2009 par Vuidel, d'après les travaux de Tobler (Tobler 1977). Cette version intègre une méthode d'analyse multidimensionnelle des proximités (MDS) et la méthode Isodist (extraite du logiciel *IsoDistAngle* développé par Vuidel en 2013) ; elle produit différents résultats statistiques (dont des mesures d'erreur) et (carto)graphiques, à articuler avec d'autres représentations.

De la distance (temps) à l'anamorphose : les méthodes

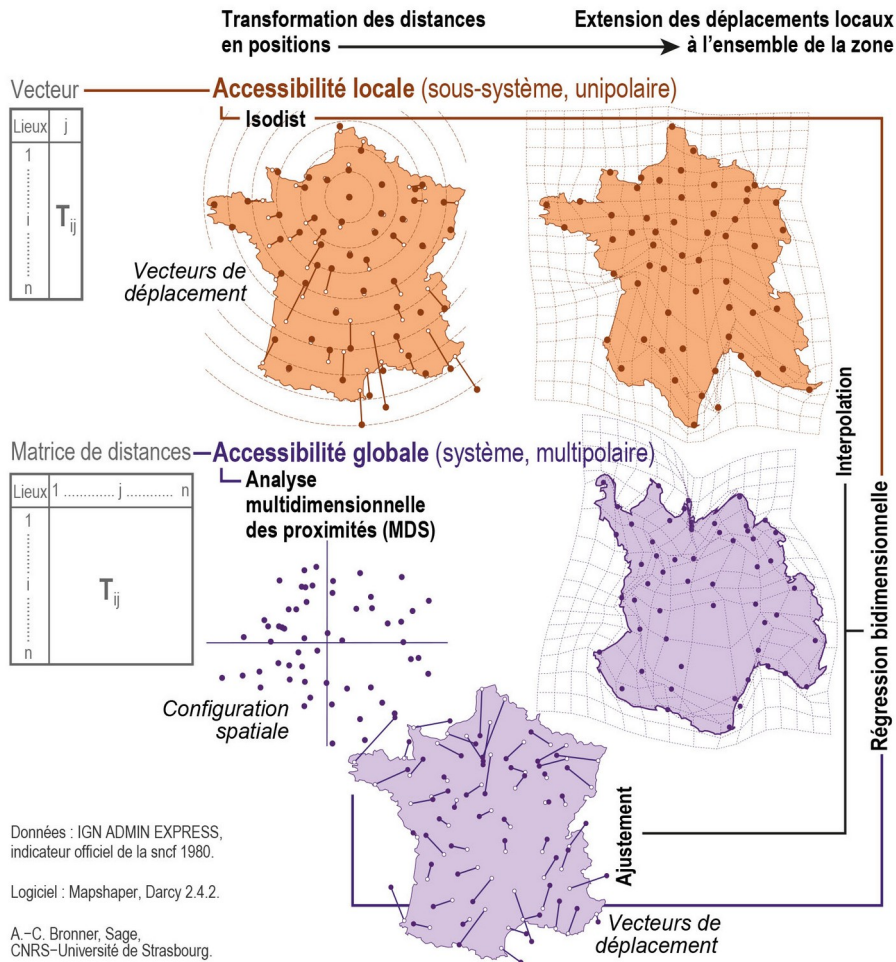


Figure 7.12. De la distance (temps) à l'anamorphose : les méthodes

La régression bidimensionnelle est une méthode développée dans les années 70 par Tobler (1977), mise en œuvre dans un programme nommé *Darcy*, en référence aux travaux de D'Arcy Thompson (1917). Elle a pour objectif de comparer deux formes, décrites par des paires de coordonnées homologues, et se compose d'un ajustement et d'une interpolation. Les résultats cartographiques et statistiques caractérisent les transformations entre les coordonnées initiales et transformées à analyser : Où sont localisés les changements ? Quelle est leur importance ? Dans quelles directions l'espace se transforme-t-il ? Etc. Des images qui se ressemblent révèlent une probable similarité au niveau des structures sous-jacentes qui ont fait émerger ces formes.

Plusieurs exemples sont proposés par l'auteur : une carte ancienne de l'Angleterre, la croissance d'une feuille de tabac, un espace perçu, deux crânes, deux dessins d'un visage. Cauvin (1998 ; 2002 ; 2008) prolonge les applications de la méthode en la déployant notamment pour l'analyse des espaces fonctionnels et des espaces cognitifs. On la retrouve ainsi dans le traitement des distances¹³, mais aussi pour décrypter certaines *sketch maps*, recueil des représentations cognitives spatiales. Elle utilise le terme « transformation cartographique de position de comparaison » dans sa classification et parle de « modèle cadre » pour cette méthode qui, dans ses différentes mises en pratique, nécessite de redéfinir les liens entre les hypothèses géographiques et l'ensemble de la chaîne de transformations données-traitement-résultats.

Encadré 7.3. À propos de la régression bidimensionnelle

La situation la plus simple sur le plan du traitement cartographique est de ne travailler que sur un vecteur (une origine vers plusieurs destinations ou plusieurs origines vers une destination).

7.3.1. L'accessibilité à un lieu (accessibilité unipolaire)

L'accessibilité unipolaire est une information facile à saisir. Il s'agit notamment de répondre à des questions du type : quels sont les espaces auxquels j'ai accès à partir de là où je me situe ? Quelle est la zone de desserte de ce lieu ressource ? ... Les réponses sont bien entendu variables dans le temps, l'espace et selon les réseaux pris en compte.

7.3.1.1. Isolignes et anamorphose : deux représentations complémentaires

La variable à traiter est une série de valeurs attachées à des localisations, des temps mesurés, simulés, pratiqués... exprimés en minutes (heures, jours...). La visualisation la plus efficace sur le plan de la communication de l'information est une représentation surfacique continue du temps d'accès (via une méthode d'interpolation), qui nécessite de disposer de points de mesure qui couvrent l'ensemble de la zone d'étude (voir figure 7.13). Le tracé des isolignes visualise des pas de temps : si le réseau est homogène et isotrope, plus on va loin, plus le temps s'allonge et le tracé des isolignes est plus ou moins circulaire : c'est le cas des distances routières ou piétonnes à moyenne et petite échelle. Les formes moins

13. Dans ce contexte de recherche, la régression bidimensionnelle compare deux séries de points homologues décrivant espace géographique vs espace-temps, espace-temps à temps t vs espace-temps à temps $t-1$ ou $t+1$, espace-temps mesuré sur un réseau vs espace-temps issu de pratiques individuelles ou collectives vs espace-temps estimé par des personnes ou groupes.

régulières s'interprètent tout aussi facilement : les indentations font émerger les couloirs de plus grande accessibilité, et *a contrario*, des incurvations marquent les zones périphériques et enclavées (par exemple le sillon du Rhône *versus* les zones montagneuses pour la France). Le réseau ferroviaire français dessine une étoile centrée sur Paris avec très peu de connexions transversales : la carte de 1980 montre des déséquilibres territoriaux qui vont se renforcer au cours du déploiement du réseau LGV. Si les villes périphériques (Nice, Brest...) sont nécessairement éloignées des autres lieux, que dire de Bourges qui est pourtant proche de Paris.

Soulignons que les *time map*, *travel time map* ou autres *isochronic map*¹⁴ ne sont pas récentes. On cite volontiers l'*isochronic passage chart for travellers* de F. Galton dessinée en 1881. Quant à l'anamorphose, on la retrouve dans les travaux de Cheysson en 1889 pour sa carte de l'accélération des voyages en France, avec un point de vue plutôt métaphorique, ou chez Bunge en 1960 avec l'*isometric map* de Seattle référencée dans la thèse de Tobler (1961) dans une approche plus analytique, qui permet de surcroît de comprendre le passage de l'espace planimétrique à l'espace-temps ; passage que l'on retrouve sur la figure 7.13, avec la transformation cartographique des isolignes irrégulières (cartes du haut) en isochrones circulaires (cartes du bas).

7.3.1.2. L'anamorphose unipolaire : Isodist et l'interpolation de la régression bidimensionnelle

Un premier procédé mathématique, Isodist, développé en 1991 par Cauvin (2008), déplace les positions géographiques par un calcul vectoriel prenant en compte la valeur du lien (ici le temps de parcours) vers ou à partir d'un lieu source.

14. Le calcul automatisé d'isochrones apparaît aujourd'hui comme une fonctionnalité dans différentes applications, interfaces ou serveurs en ligne, sur la base de temps simulés sur des réseaux, cartographiant à la volée l'espace accessible à partir d'une position, par exemple l'application ISO4APP (K-SOL).

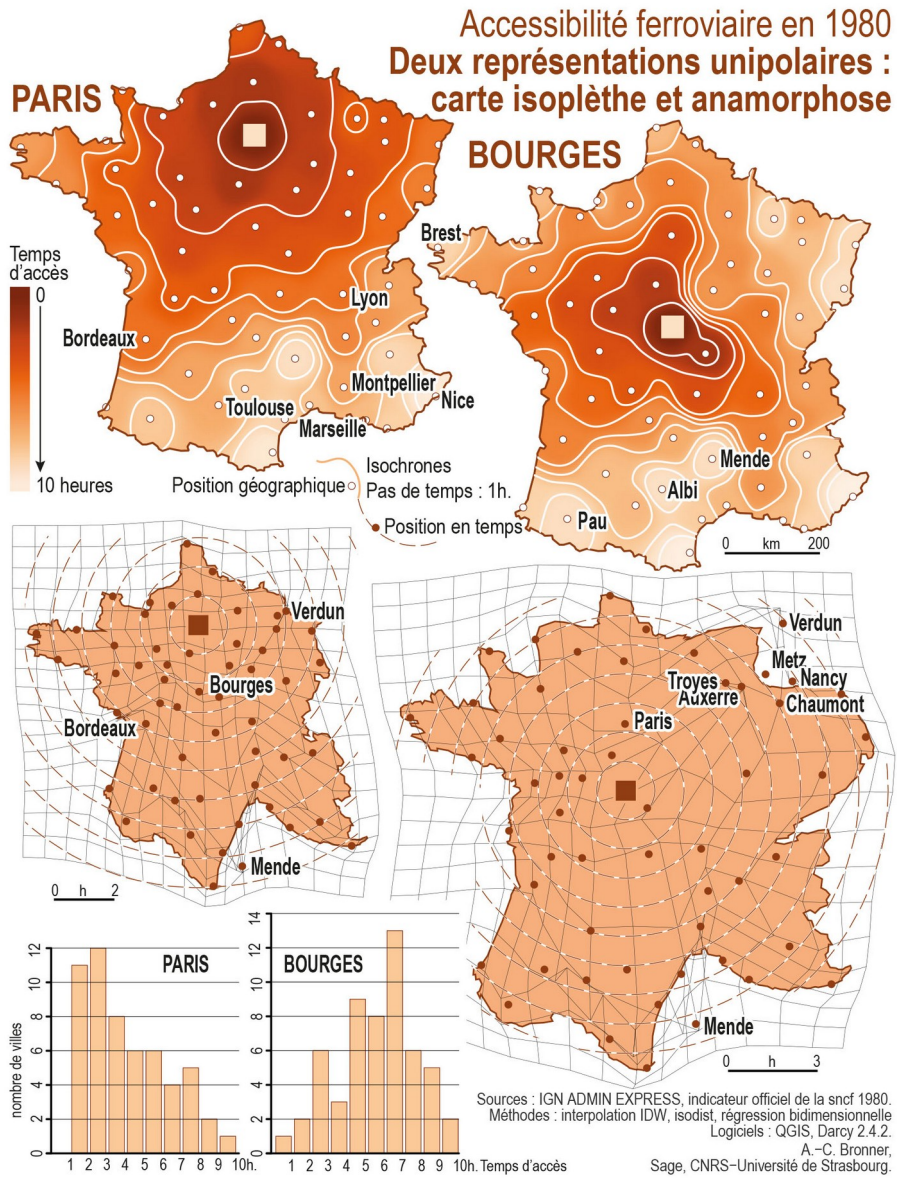


Figure 7.13. Deux représentations de l'accessibilité :
carte isoplèthe et anamorphose unipolaire

Un coefficient d'équivalence (voir figure 7.14, à gauche), qui peut être une vitesse moyenne calculée¹⁵ ou fixée (dans le cadre d'une analyse comparative nécessitant de conserver le même espace-temps) permet de ramener les temps T (exprimés en minutes, heures, jours...) et les distances (métriques, kilométriques...) dans le même référentiel. Par une simple soustraction entre distance temps DT et distance D, on détermine la longueur du vecteur de déplacement (la norme) et le sens (le signe de la norme). La direction est définie par l'angle formé avec la position du lieu source. Par ce calcul, la position « géographique » est transformée en position en temps en se rapprochant ou en s'éloignant du lieu source.

Isodist produit différents résultats présentés sur la figure 7.14 : le fichier des nouvelles coordonnées en distances temps, une ou plusieurs cartes qui affichent les isochrones (qui matérialisent la nouvelle échelle de la carte : le temps), les vecteurs de déplacement, les positions en temps, distinguant éventuellement les lieux qui « se rapprochent » (valeurs temps inférieures à celles obtenues avec le coefficient d'équivalence) et les lieux qui « s'éloignent » (valeurs temps supérieures à celles obtenues avec le coefficient d'équivalence). Le contour et les localisations initiales sont les traces des données en entrée dans le traitement.

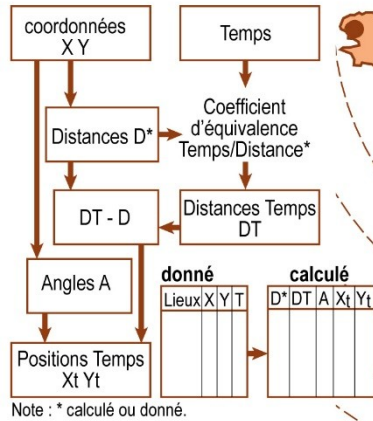
Le passage à une représentation continue du phénomène se fait par l'interpolation¹⁶ de la régression bidimensionnelle qui généralise les déplacements locaux en tous points du territoire. Le champ vectoriel et le champ de forces de déplacement au bas de la figure 7.15 sont des résultats alternatifs à l'anamorphose, qui illustrent bien cette phase d'interpolation. Ils matérialisent les déplacements (orientation et longueurs des vecteurs), d'une part, et soulignent les mouvements de convergence (zones dans les tons vert, où l'espace se contracte au niveau de l'anamorphose) ou de répulsion (zones dans les tons rouge, correspondant aux massifs montagneux moins accessibles qui vont se dilater), d'autre part.

15. Calculée sur un vecteur ou une matrice, la vitesse égale la somme des temps divisée par la somme des distances. Les distances sont calculées à partir des coordonnées, ou fournies lorsque le référentiel planimétrique n'est pas pertinent.

16. Une grille pondérée permet de déterminer les déplacements « moyens » en chaque nœud, qui peuvent être étendus alors à tous les éléments d'habillage de la carte (le contour de la carte, un réseau...).

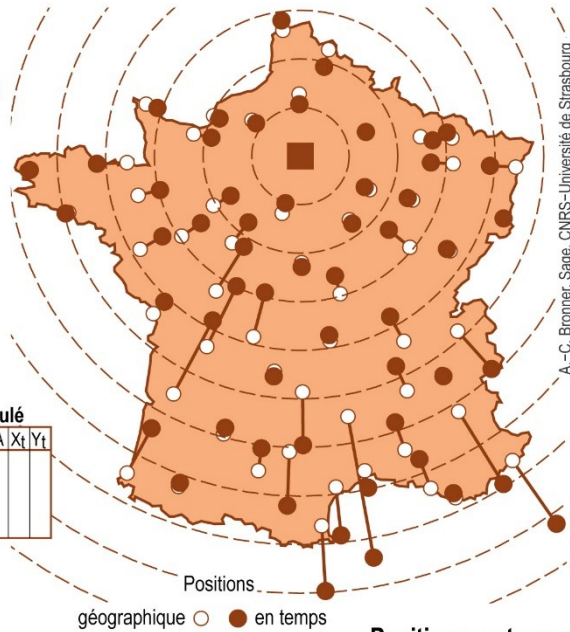
Isodist

Des coordonnées géographiques aux positions en temps



Note : * calculé ou donné.

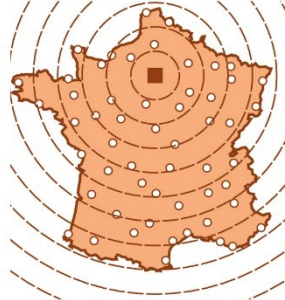
Accessibilité ferroviaire à Paris en 1980



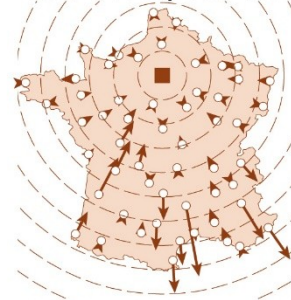
A.-C. Bronner, Sage, CNRS—Université de Strasbourg

Isochrones : tracé de l'espace temps

Pas de temps : 1 heure. Base : 90km/h

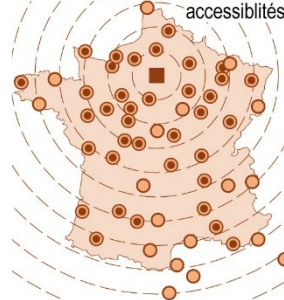


Vecteurs de déplacement



Positions en temps

● bonnes et ● mauvaises accessibilités*

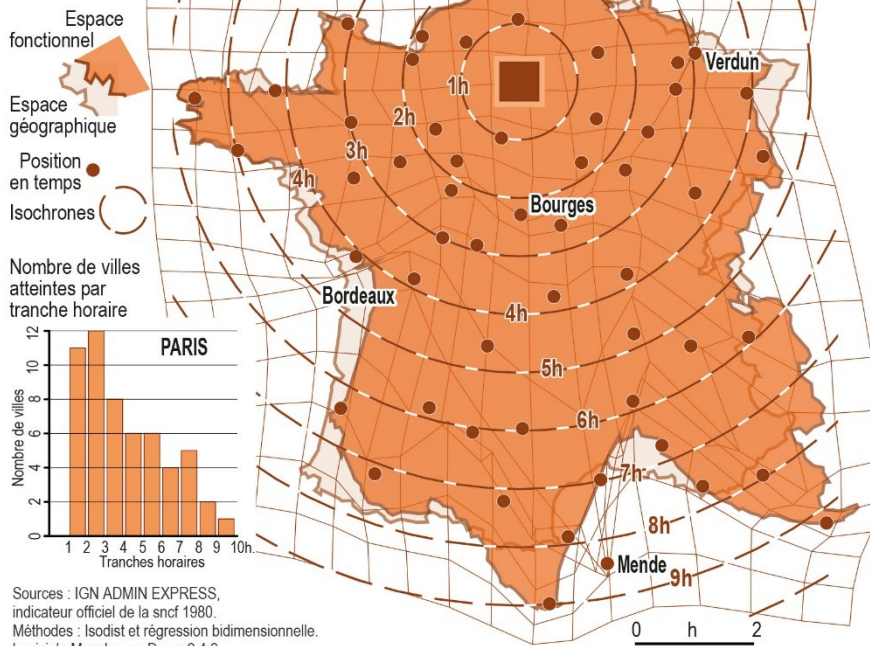


* supérieure (se rapproche) ou inférieure (s'éloigne) ; coefficient d'équivalence (vitesse de référence) : 90km/h

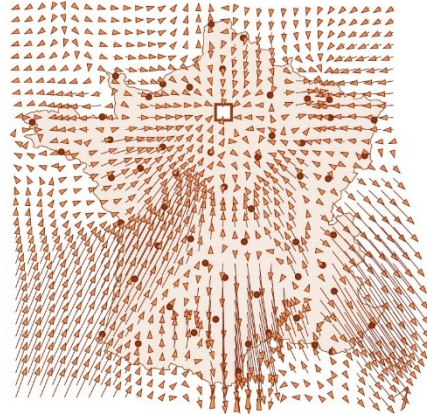
Sources : IGN/GEOFLA, indicateur officiel de la sncf 1980. Méthode : Isodist. Logiciel : Darcy 2.4.2.

Figure 7.14. Des coordonnées géographiques aux positions en temps

Accessibilité ferroviaire à Paris en 1980 Anamorphose unipolaire



Champ vectoriel



Champ de forces de déplacement

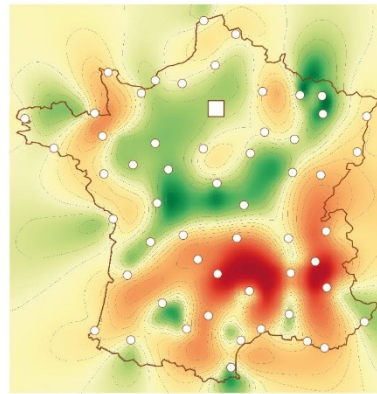


Figure 7.15. Anamorphose unipolaire

La grille de l'anamorphose est un élément d'habillage qui permet la lecture des transformations et de repérer notamment les inversions dans l'espace géographique : des espaces proches sur le plan planimétrique vont être déplacés « derrière » des lieux plus éloignés. Par exemple Mende, peu accessible par le rail, plonge dans le

bassin méditerranéen, au sud des villes côtières méditerranéennes. Si l'on revient à la figure 7.13 qui compare Paris et Bourges, cette dernière globalement moins accessible présente un espace-temps dilaté et apparaît mal reliée à ses voisines situées à l'est.

Parallèlement à l'accessibilité ciblée sur un lieu, il est intéressant de créer une vision globale, cherchant à prendre en compte simultanément les temps d'accès de tous les lieux vers tous les lieux.

7.3.2. L'accessibilité entre tous les lieux (accessibilité multipolaire)

Éminemment plus complexe à lire (voire à concevoir), l'anamorphose multipolaire opère sur la matrice complète. La transformation cartographique, reposant sur un positionnement relatif des lieux issu des distances temps, rapproche les lieux mieux reliés entre eux et à l'ensemble du territoire, et éloigne, en général sur les marges, les nœuds périphériques ou enclavés, moins accessibles ou mal connectés.

7.3.2.1. La réduction d'une matrice de distances en 2 dimensions : les MDS

Les *multidimensional scaling* (MDS), ou analyses multidimensionnelles des proximités, font partie des traitements statistiques multivariés (Groenen, Borg 2015 ; Mair *et al.* 2019). Utilisées en génétique, psychologie, sociologie, géographie..., les MDS ont pour objectif de « réduire » en deux (voire trois) dimensions une matrice de distances de $n \times n$ dimensions (dans notre cas, la matrice origine-destination des distances temps mesurées entre entités localisées spatialement). Il s'agit d'obtenir un semis de points dont les distances correspondent aux valeurs de la matrice initiale, ou du moins en sont le plus proches possible. Aujourd'hui, les algorithmes disponibles semblent être classés en MDS classique, métrique et non métrique, à utiliser en lien avec le type de données à traiter, leur signification.

Qu'il s'agisse de MDS ou d'autres procédés qui poursuivent le même objectif (Cauvin *et al.* 2008), les valeurs résultantes peuvent être visualisées sous la forme d'une configuration accompagnée, selon les méthodes, d'une mesure de qualité (GoF, stress, R^2 ...). La figure 7.16 montre une configuration issue de la matrice des temps d'accessibilité par le rail en 1980, résultat d'une MDS non métrique (Shepard 1957 ; Kruskal 1964 ; Mair *et al.* 2019), un procédé itératif qui reconfigure les positions par minimisation du stress, critère d'ajustement calculé sur la base des distances (entre les positions de la configuration) et des proximités (issues des distances temps). Le diagramme de Shepard met en relation ces deux dimensions : distances et proximités. La forme du nuage de points, accompagné du stress, permet de qualifier le résultat de cette analyse statistique : si les points sont alignés et la valeur du stress tend vers 0, la configuration est une représentation possible et valide de la matrice de distances.

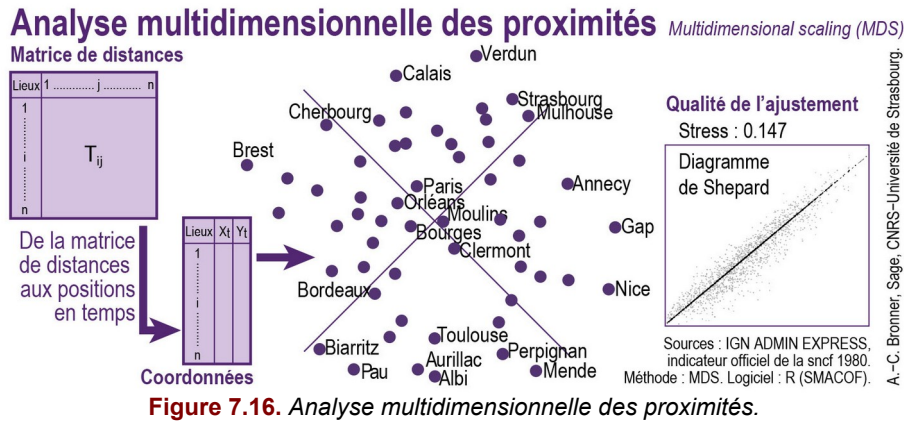


Figure 7.16. Analyse multidimensionnelle des proximités.

7.3.2.2. Des positions-temps à l'espace-temps : la régression bidimensionnelle

Pour créer l'anamorphose, les deux étapes de la régression bidimensionnelle sont mises en œuvre. *L'ajustement*, détaillé sur la figure 7.17, permet de ramener dans un espace de référence (l'espace géographique en général) les coordonnées a-spatiales issues du MDS (l'espace-temps multipolaire) : il combine une translation, une rotation et un changement d'échelle. Des indicateurs statistiques résument la qualité de l'ajustement (R^2) et indiquent les directions privilégiées et déplacements moyens exprimés dans l'unité de la carte (RMSE). La carte des vecteurs de déplacements souligne les différences d'organisation entre l'ancrage planimétrique des lieux étudiés et les positions en temps issues de l'ajustement. En 1980, aucune ligne à grande vitesse n'est en place, excepté la liaison entre Strasbourg et Mulhouse à 200km/h : seule la structure du réseau ferroviaire étoilé centré sur Paris explique les variations spatiales.

L'anamorphose des distances temps issue de *l'interpolation* – étape 2 de la régression bidimensionnelle déjà citée dans le point sur l'accessibilité unipolaire –, révèle la structure sous-jacente du réseau de transport. L'intérêt est de pouvoir comparer différents réseaux (selon les modes ou dans le temps) en s'appuyant sur les indicateurs statistiques, l'anamorphose cartographique et d'autres cartes issues du traitement (champ vectoriel, champ de forces de déplacement...). Les aménagements successifs du réseau ferroviaire français sont visibles sur la figure 7.18 : le renforcement des discriminations spatiales via le réseau LGV (ligne à grande vitesse), une accessibilité à deux vitesses (cohabitation de réseaux régionaux plus ou moins développés et des LGV), le délaissement des liaisons transversales déjà peu présentes ainsi que des lignes de type intercity déstructurent le territoire sur le plan de l'accessibilité. La grille permet de révéler des inversions spatiales avec des gares situées au cœur de l'espace géographique, qui se retrouvent de plus en plus marginalisées au sein de l'espace-temps.

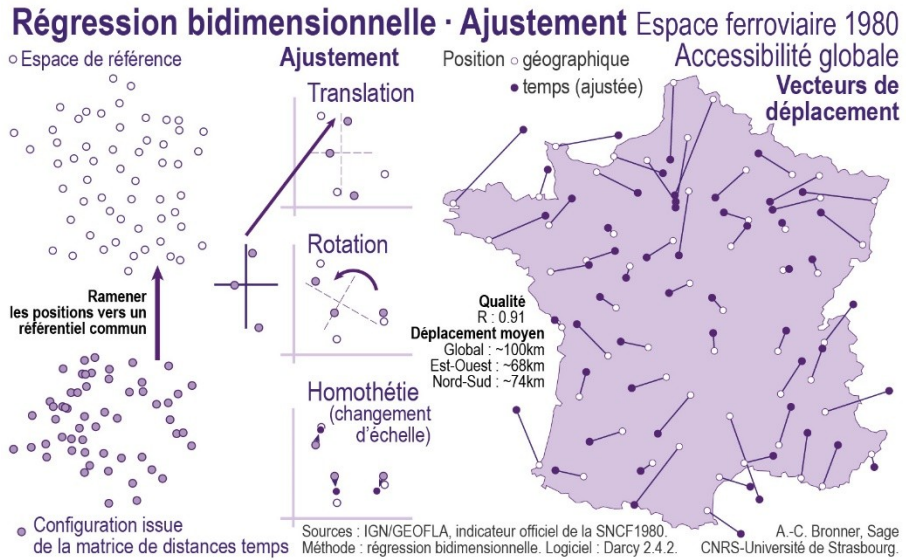


Figure 7.17. Régression multidimensionnelle. L'ajustement

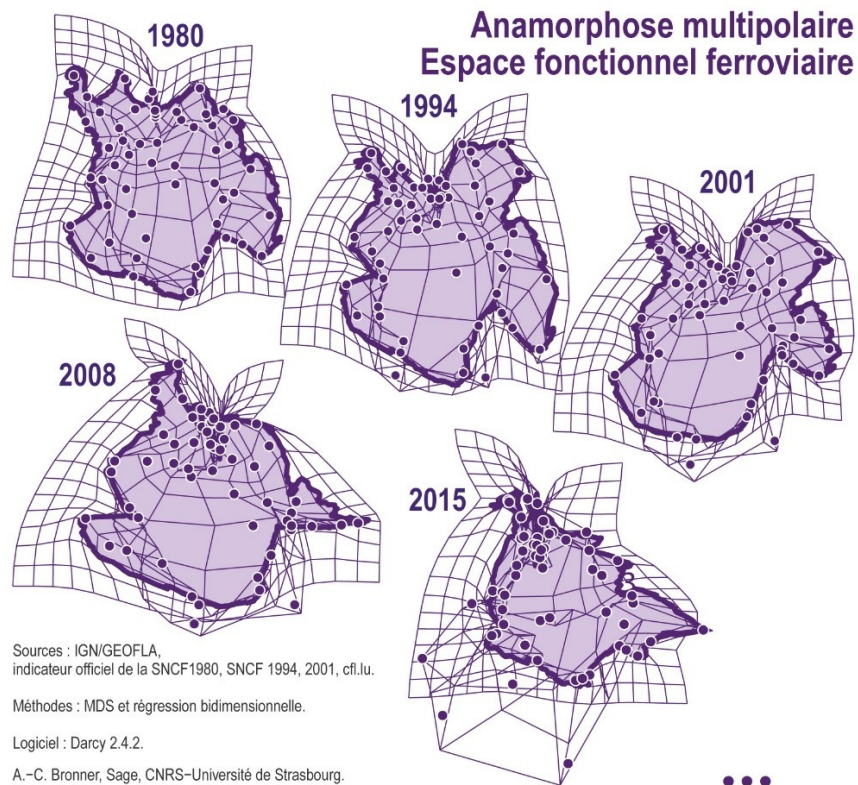


Figure 7.18. Anamorphose multipolaire

La production d'anamorphose sur la base de distances génère ainsi un grand nombre de représentations, indicateurs statistiques et mesures de qualité, facilitant la validation des résultats et la gestion de la propagation des erreurs dans la chaîne méthodologique. Les cartes de l'espace-temps permettent de révéler l'organisation spatiale de différents modes de transport ou une évolution d'un réseau dans le temps, de souligner des inégalités territoriales, de comparer différents espaces (géographique, temps, coût, cognitif...), de créer le cas échéant un fond de carte alternatif, avec un positionnement des lieux fondés sur leur accessibilité, leurs liens.

Pour compléter ce panorama des méthodes et en lien avec l'idée de distance, quelques mots sur les projections azimutales appelées également *fisheye* (« œil de poisson »).

7.3.3. La transformation azimutale

La transformation azimutale ou projection « œil de poisson », d'après *fisheye projection*, s'illustre par des références comme *Balcony* de M.C. Escher dans le champ de l'Art, *Le plan Morant* de 1548 pour les cartes anciennes ou la carte d'Asby de Hägerstrand (Hannerberg, Hägerstrand 1957) en cartographie. Une fonction mathématique transforme les tracés géographiques d'un territoire à partir d'un point : *Fischaug-Projektionen* (Rase 1997), *azimuthal projection* ou *transformation*, (Tobler 1959 ; Cerny 1971 ; Boutoura 2006), *variable-scale map projections* (Fairbairn, Taylor 1995). Ces méthodes revêtent à notre sens plusieurs intérêts.

Lorsque la fonction utilisée ajuste une série de distances (temps), la carte peut être assimilée à un lissage spatial, une généralisation de l'espace-temps (Cauvin 1997 ; Cauvin *et al.* 2008). Notons que seul ce type d'application classe ces méthodes dans le système d'anamorphose, où la variable thématique intervient dans le calcul des nouvelles formes territoriales. Dans les autres cas, la fonction permet de créer *un focus* pour mieux visualiser et comprendre un phénomène spatial, finalité proche de l'idée du *zoom continu* développé pour gérer la concentration d'objets géographiques, accroître la lisibilité en dilatant les zones de forte densité graphique (Rase 1981 ; 1997 ; Boutoura 2006). Il est ainsi possible de *cartographier plusieurs échelles tout en conservant une continuité spatiale* (alternative au carton en cartographie). La transformation sert également à illustrer *un point de vue égocentré* ou une vue métaphorique de notre connexion accélérée aux espaces lointains au détriment des relations de proximité.

Sur la figure 7.19, illustration de la méthode qui revient sur l'exemple du second tour des présidentielles 2017 dans la région du Grand Est, le zoom continu sur la Haute-Marne souligne le comportement électoral de très petites communes rurales

dont les taux sont *de facto* plus extrêmes, puisque le nombre d'habitants, donc de votes exprimés, est réduit.

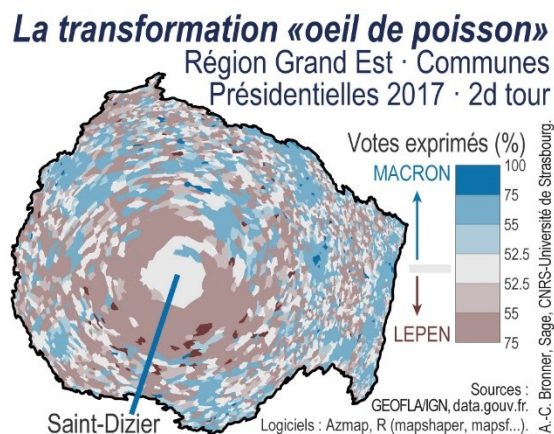


Figure 7.19. Projection « oeil de poisson » ou transformation azimutale

Sortir de l'ombre les méthodes qui sont derrière les cartes par anamorphose les plus « courantes », connues, permettra, nous l'espérons, de mieux les articuler entre elles et avec d'autres traitements des données localisées, notamment pour multiplier les regards croisés et enrichir les recherches. Nous proposons quelques compléments dans une dernière partie pour appréhender plus finement encore différents aspects autour de la construction ou de la difficulté de lecture et d'interprétation de ces images.

7.4. Anamorphoses, cartogrammes : réflexions transversales sur des préceptes communs aux méthodes et les difficultés de lecture

L'emploi d'une grande partie de ces méthodes repose sur différents principes, règles ou postulats.

7.4.1. Quelques principes sous-jacents à l'ensemble des méthodes

Quelques traits communs traversent une majorité des transformations cartographiques de positions.

7.4.4.1. Continuité spatiale du phénomène étudié

Sur un cartogramme continu, une anamorphose de l'espace-temps dérivée d'une matrice de distances ou une carte piézoplèthe, le territoire apparaît transformé en tous points. En mobilisant ce type de méthodes, nous nous accordons sur une vision continue du phénomène qui est analysé. Si la continuité spatiale est indubitable pour différentes manifestations physiques comme les phénomènes atmosphériques (température, précipitation, pollution de l'air...), elle sera discutée avec le cartographe thématique pour la représentation de l'accessibilité ou la répartition des populations.

La continuité spatiale engendre des contraintes au niveau du jeu de données : ce dernier comportera des observations en nombre suffisant, « représentatives » et réparties sur l'ensemble de la zone cartographiée (sans valeurs manquantes). Le jeu de données pour créer une anamorphose des distances doit couvrir toute la zone, y compris les zones éloignées, mal desservies ; les éventuelles opérations de filtrage, par exemple la sélection des liaisons les plus performantes sont discutables. De même, un cartogramme continu d'un territoire sera peu valide si une partie des entités n'est pas concernée par le phénomène : le processus itératif de l'algorithme qui réduit les surfaces ne pourra pas ramener une entité géographique à une surface nulle.

7.4.4.2. Connexion entre forme et structure

L'utilisation des transformations cartographiques de position nécessite de s'accorder avec un postulat dérivé des travaux de D'Arcy Thompson *On Growth and Form* (1917), et cité ainsi par Cauvin (Cauvin *et al.* 2008, p.17) : « 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. ». Les territoires transformés par la variable thématique (un poids, une distance, une quantité...) révèlent les structures et processus sous-jacents. La comparaison des formes permet d'illustrer et d'analyser l'évolution du réseau ferroviaire au cours du temps, les organisations territoriales pour différents modes de déplacement, les processus conduisant aux inégalités de répartition des populations, des richesses, de santé...

7.4.4.3. Reproductibilité

La majorité des anamorphoses cartographiques est issue de procédés mathématiques, le résultat d'un algorithme plus ou moins complexe qui prend en compte simultanément la localisation et la valeur thématique associée. Ces transformations cartographiques permettent de calculer de nouvelles positions et formes et produisent généralement une mesure de qualité (permettant de valider l'image cartographique et de gérer la propagation des erreurs).

D'autres traits communs sont présents au niveau de l'habillage des anamorphoses cartographiques.

7.4.2. Habillage des anamorphoses

Les anamorphoses se caractérisent par la disparition de l'espace planimétrique, même s'il est possible de maintenir une miniature ou un filigrane de l'espace non transformé. *La grille est un élément graphique important qui permet de lire les transformations.* Si les toponymes entravent la lisibilité et l'esthétique de la carte, ils sont nécessaires pour interpréter les positionnements relatifs des lieux. Les informations sur la source des données sont complétées par le nom des méthodes, qui contribue à la compréhension de la production de la carte, et celui des outils pour assurer sa reproductibilité. Si la place est disponible, un encart méthodologique peut être ajouté et, une carte ne naviguant jamais seule, les clés d'interprétation apparaissent dans la notice ou le commentaire.

7.4.2.1. La légende, l'échelle et le nord

Dans le système d'anamorphose, l'échelle devient souvent un élément de légende de la carte, la thématique étant inscrite dans la dimension spatiale. L'échelle (plani)métrique est remplacée par :

- une échelle temporelle sur l'anamorphose unipolaire, matérialisée souvent uniquement par le tracé des isochrones ;
- des surfaces unitaires de référence pour le cartogramme, souvent oubliées, notamment lorsque ce dernier sert de fond de carte.

La direction du Nord est peu pertinente.

7.4.2.2. L'anamorphose comme système de projection

Le cartogramme continu est souvent utilisé tel un système de projection, pour créer un fond de carte qu'il s'agisse de cartographier des taux (voir figure 7.2) ou de superposer des couches d'information, offrant la possibilité d'enrichir l'exploration et l'analyse de données par la combinaison d'informations thématiques, comme zone inondable et population (Andrieu 2014). Cet ensemble de sorties graphiques permet par ailleurs un travail intéressant sur le plan esthétique, en utilisant la densité graphique des tracés ou de la grille pour modéliser la répartition du phénomène étudié (voir les cartes de Dutenkefer (2018)).

Pour les procédés qui n'intègrent pas un changement de base spatiale (cercle, carré, hexagone, tessellation), une généralisation modérée des tracés du fond de

carte de départ, trop peu mise en œuvre en cartographie en général, et pour les cartogrammes en particulier, permet notamment de réduire le temps de calcul, le poids des fichiers, la densité graphique, de simplifier les formes et d'améliorer la lecture. La carte de référence respectera quant à elle les surfaces des territoires (système de projection équivalente).

Quand bien même toute l'intention sera portée sur l'habillage et la légende de ces cartes, des biais de lecture spécifiques à ce type de représentation apparaissent.

7.4.3. Lire, comprendre les anamorphoses : quelques difficultés

Tout en étant complexes à décrypter, les anamorphoses sont particulièrement attractives sur le plan de la communication, car elles allient deux variables visuelles efficaces sur le plan perceptif : la variation de taille et la variation de forme, qui seraient plus opérantes que les variations de couleur, valeur, texture, grain ou orientation. En effet, l'information représentée provoquera des dilatations, contractions, étirements, resserrements, gonflements, rétrécissements... de l'espace, qui redessinent les formes du territoire et ne manquent pas d'interpeler les lecteurs. Mais, comme toute géodatavisualisation, le message peut échapper aux destinataires. Trois difficultés peuvent être notamment identifiées¹⁷.

– *La perte de repères* lorsque l'on est en face d'une anamorphose d'un territoire connu est un classique¹⁸. Une partie du temps de lecture est consacrée à chercher des connexions entre tracés géographiques familiers et tracés transformés, au lieu d'évaluer les rapports de surface ou les proximités entre les lieux. Un affichage de la forme « classique » en arrière-plan ou à proximité, des toponymes, *le filigrane de la grille* qui dévoile le passage entre espace de référence et espace thématique ou encore *l'animation des tracés entre forme initiale et forme transformée* peuvent partiellement résoudre ce frein à la compréhension de la carte. À ce propos, l'un des points importants qui n'ont pu être abordés est celui des animations cartographiques, qui sont particulièrement adaptées pour les anamorphoses. Elles permettent de mieux cerner le passage entre deux formes ou de travailler sur des données longitudinales, de comprendre les transformations entre espace géographique et espace thématique ou entre deux espaces thématiques, de montrer l'évolution de la population mondiale ou l'accélération des temps de déplacement...

– Une deuxième difficulté dans l'interprétation de la carte apparaît lors de l'emploi très répandu du cartogramme comme fond de carte sur lequel on reporte une seconde information – usage que nous avons volontairement reproduit dans ce

17. Difficultés de lecture repérées par l'autrice lors de présentation de travaux dans le cadre d'événements scientifiques ouverts au public ou de formations en cartographie.

18. Ce décalage avec une forme considérée comme « juste », se rencontre aussi lorsque l'on s'éloigne de la projection de Mercator européenne centrée à l'échelle mondiale.

chapitre en reportant les résultats d'élections sur les cartogrammes du nombre d'inscrits. La variation de forme/de surface se combine à des aplats et contraint à une double lecture. Cette complexité est soulevée par toute *représentation qui cumule plusieurs variables*, comme l'utilisation controversée des cercles proportionnels pour des quantités brutes avec une seconde variable thématique de type ratio ou catégorie en aplat à l'intérieur des figurés.

– Une autre erreur de lecture rencontrée est liée à la *perception visuelle et aux conventions cartographiques*. Par convention, les zones sombres représentent les valeurs les plus élevées, les zones claires les valeurs les plus faibles. C'est pourquoi, des personnes attribuent spontanément aux secteurs perçus comme foncés sur la carte les parts les plus importantes du phénomène représenté et inversement. Or, sur certains cartogrammes, les zones sombres créées par une concentration graphique sont les moins concernées par le phénomène représenté.

– Enfin, toutes choses égales par ailleurs, la compréhension de l'anamorphose varie selon *l'étendue de la zone cartographiée*. En effet, à l'échelle mondiale, le cartogramme continu constitue un diagramme de la répartition des grandes masses du phénomène étudié et est plutôt bien perçu. C'est le cas également aux échelles continentales et subcontinentales, nationales, voire régionales. À ces échelles, si le niveau de granularité le permet, le cartogramme continu va laisser progressivement apparaître la localisation et le poids des zones métropolitaines, étayant les possibilités de visualiser la dynamique de la métropolisation si l'on dispose de bases de données longitudinales. Les entités peu concernées par le phénomène vont être comprimées et apparaissent sous formes d'axones écrasés entre deux masses ou à la périphérie de l'espace cartographié. Aux échelles locales, quand bien même le territoire est connu, l'hétérogénéité des espaces compose une image souvent moins lisible. En effet, si l'organisation spatiale d'un phénomène sous forme de pôles et de grandes zones continues peu concernées est présente au niveau régional, à l'échelle métropolitaine l'image montrera un cœur plus gonflé, les communes périphériques peu peuplées se réduisant à des filaments. À l'échelle de la ville, le cartogramme révèle la forte variabilité de l'espace urbain.

Plus qu'une galerie de cartogrammes ou anamorphoses, nous avons tenté un panorama non exhaustif des méthodes en espérant avoir donné les clés, non seulement pour les lire et les comprendre, mais aussi l'esprit et le cadre général pour les produire. Comme toutes les cartes, les cartogrammes ou anamorphoses sont des transformations de la réalité et s'inscrivent au sein d'une problématique scientifique, qu'il s'agisse d'une phase descriptive, exploratoire, prédictive ou confirmatoire de la recherche menée.

7.5. Conclusion

L'objectif de ce chapitre est d'ancrer la spécificité du système d'anamorphose, une transformation des territoires dessinée par une variable thématique, qui intervient « directement » dans le traitement, l'image « incarne » la méthode ; elle est le produit d'une équation qui lie dimension spatiale (XY) et attributaire Z : $X=f(Z)$ et $Y=g(Z)$.

Le travail avec les anamorphoses permet d'alimenter les discussions autour de la question du fond de carte : un espace planimétrique, un positionnement absolu des lieux, nécessaire pour arpenter, mesurer, décrire, comprendre le visible, *versus* un espace thématique-géographique, construit sur un positionnement relatif des entités géographiques. Alors même que jouer avec les systèmes de projections à l'échelle mondiale souligne le fait que les formes de l'espace terrestre sont multiples, nous nous débarrassons difficilement du référentiel apparemment immuable du planisphère européo-centré de Mercator (voir chapitre 1). C'est dire combien il nous est difficile de transformer notre fond planimétrique, les positions des lieux, les formes de territoires, d'établir de nouveaux rapports entre les entités cartographiées, ce qui est pourtant central lorsque l'on travaille avec des données socio-démographiques (Ballas *et al.* 2014) ou sur des territoires pratiqués ou « vécus ». La difficulté tient au fait que l'interprétation des résultats nécessite de comprendre *a minima* non seulement la variable cartographiée, mais aussi les méthodes de construction, que nous avons tenté d'éclairer dans ce chapitre.

Quand bien même nous avons plusieurs fois utilisé le terme de métaphore dans ce chapitre, nous espérons avoir sorti l'anamorphose de son assignation triviale, à savoir un simple produit de communication, utilisée pour son seul impact visuel. L'usage premier de ces méthodes est de révéler les structures, les processus et les dynamiques *via* la forme des territoires.

7.6. Bibliographie

- Andrieu, D. (2014). Les cartogrammes : une séquence d'enseignement de la sémiologie à la géographie. *Carte & Géomatique, revue du Comité français de cartographie*, 222, 123–138 En ligne : www.lecfc.fr.
- Andrieu, D., Kaiser, C., Ourednik, A. (2008). *Scapetoad*. [Logiciel]. En ligne : scapetoad.choros.place/.
- Ballas, D., Dorling, D., Hennig, B. (2014). *The social atlas of Europe* Policy Press, Bristol, UK, 216 p.
- Bertin, J. (1973). *Sémiologie graphique : les diagrammes, les réseaux, les cartes*, 2e édition. Éditions Mouton et Gauthier-Villars, Paris, France, 431 p.

- Bortins, I., Demers, S., Clarke, K.D. (2002). *Cartogram Types*. [Site web]. En ligne : ncgia.ucsb.edu/projects/Cartogram_Central/types.html.
- Boutoura, C. (2006). Logarithmic Urban Thematic Mapping In Mis Environment. *Cartographica: The International Journal for Geographic Information and Geovisualization*. DOI: 10.3138/C0XG-1260-5808-34HX.
- Bunge, W. (1966). *Theoretical geography*. Gleerup, Lund, SE, 210 p.
- Cano, R.G., Buchin, K., Castermans, T., Pieterse, A., Sonke, W., Speckmann, B. (2015). Mosaic Drawings and Cartograms. *Computer Graphics Forum*, 34(3), 361–370. DOI: 10.1111/cgf.12648
- Cauvin, C. (1997). Au sujet des transformations cartographiques de position. *Cybergeo: European Journal of Geography*, Cartographie, Imagerie, SIG, document 15. DOI: 10.4000/cybergeo.5385.
- Cauvin, C. (1998). Usagers et représentations cognitives de la ville : exemples à Strasbourg. Dans *L'espace géographique des villes: pour une synergie multistrates*. Cauvin, C., R. Kleinschmager, and Laboratoire Image et ville (eds.) Villes. Anthropos : Economica, Paris, France, 301–346.
- Cauvin, C. (2002). Cognitive and cartographic representations: towards a comprehensive approach. *Cybergeo: European Journal of Geography*, Cartographie, Imagerie, SIG, document 206. DOI: 10.4000/cybergeo.194.
- Cauvin, C. (2005). A systemic approach to transport accessibility. A methodology developed in Strasbourg: 1982-2002. *Cybergeo: European Journal of Geography*, Systèmes, Modélisation, Géostatistiques, document 311. DOI: 10.4000/cybergeo.3425.
- Cauvin, C., Escobar, F., Serradj, A., Antoni, J.-P. (2008). *Cartographie thématique. 4, Des transformations renouvelées* Hermes science : Lavoisier, Paris, France, 198 p.
- Cauvin C., Lepetit B., Reymond H., 1987, Cartes postales : un espace de relation dans la France pré-industrielle., *Histoire de la mesure*, II-3/4. p. 89-114.
- Cauvin, C., Schneider, C. (1989). Cartographic transformations and the piezopleth maps method. *The Cartographic Journal*, 26(2), 96–104. DOI: 10.1179/caj.1989.26.2.96.
- Cerny, J.W. (1971). A computer program for azimuthal map transformations. *The Professional Geographer*, 23(2), 144–145. DOI: 10.1111/j.0033-0124.1971.00144.x.
- Cornillon, P.-A., Demoraes, F. (2021). *Package cartogramR: User guide*. [R package version 1.0-9]. En ligne : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03280009>.
- D'Arcy Thompson, W. (1917). *On Growth and Form*. Cambridge: at the University Press, Cambridge, UK. En ligne : www.gutenberg.org/files/55264/55264-h/55264-h.htm.

- Dorling, D. (1991). *The Visualization of Spatial Social Structure*. Thèse de doctorat, University of Newcastle upon Tyne, UK. En ligne : www.dannydorling.org.
- Dorling, D. (1996). *Area Cartograms: Their Use and Creation*. CATMOG: Concepts and Techniques in Modern Geography 59, Department of Geography, University of Durham, UK, 69 p. En ligne : www.dannydorling.org.
- Dorling, D. (2007). Worldmapper: The Human Anatomy of a Small Planet. *PLoS Medicine*, 4(1), e1. DOI: 10.1371/journal.pmed.0040001.
- Dougenik, J.A., Chrisman, N.R., Niemeyer, D.R. (1985). An Algorithm to Construct Continuous Area Cartograms. *The Professional Geographer*, 37(1), 75–81. DOI: 10.1111/j.0033-0124.1985.00075.x.
- Dutenkefer, E. (2018). *A cidade e o mapa: representações cartográficas da urbanidade de São Paulo*. Thèse de doctorat, Doutorado em Geografia Humana, Universidade de São Paulo, BR. En ligne : teses.usp.br/teses/disponiveis/8/8136/tde-04072018-123123/publico/2018_EduardoDutenkefer_VCorr.pdf.
- Fairbairn, D., Taylor, G. (1995). Developing a variable-scale map projection for urban areas. *Computers & Geosciences*, 21(9), 1053–1064.
- Gastner, M.T., Newman, M.E.J. (2004). Diffusion-based method for producing density-equalizing maps. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 101(20), 7499–7504. DOI: 10.1073/pnas.0400280101.
- Gastner, M.T., Seguy, V., More, P. (2018). Fast flow-based algorithm for creating density-equalizing map projections. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(10), E2156–E2164. DOI: 10.1073/pnas.1712674115.
- Giraud, T., Hernangómez, D., Pecout, H. (2021). *mapsf: Thematic Cartography*. [R package 0.5.0]. En ligne : CRAN.R-project.org/package=mapsf.
- Groenen, P.J.F., Borg, I. (2015). Multidimensional Scaling II. Dans *International Encyclopedia of the Social & Behavioral Sciences* (Second Edition). Wright, J. D. (ed.) Elsevier, Oxford, 40–47. DOI: 10.1016/B978-0-08-097086-8.42167-7.
- Hannerberg, D., Hägerstrand, T. (eds.) (1957). *Migration in Sweden, a symposium*. Lund studies in geography. CWK Gleerup, Lund.
- Heilmann, R., Keim, D.A., Panse, C., Sips, M. (2004). RecMap: Rectangular Map Approximations. Dans *IEEE Symposium on Information Visualization*, Austin, TX, US, 33–40. DOI: DOI: 10.1109/INFVIS.2004.57.
- Henriques, R., Bação, F., Lobo, V. (2009). Carto-SOM: cartogram creation using self-organizing maps. *International Journal of Geographical Information Science*, 23(4), 483–511. DOI: 10.1080/13658810801958885.
- House, D.H., Kocmoud, C.J. (1998). Continuous cartogram construction. Dans *Proceedings Visualization '98*. IEEE, Research Triangle Park, NC, US, 197-204. DOI: 10.1109/VISUAL.1998.745303.

- Jeworutzki, S., Giraud, T., Lambert, N., Bivand, R., Pebesma, E., Nowosad, J. (2020). *cartogram: Create Cartograms with R*. [R package version 0.2.2]. En ligne : CRAN.R-project.org/package=cartogram.
- Kadmon, N., Shlomi, E. (1978). A Polyfocal Projection for Statistical Surfaces. *The Cartographic Journal*, 15(1), 36–41. DOI: 10.1179/caj.1978.15.1.36.
- Keim, D.A., North, S.C., Panse, C. (2004). Cartodraw: a fast algorithm for generating contiguous cartograms. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 10(1), 95–110. DOI: 10.1109/TVCG.2004.1260761.
- Kreveld van, M., Speckmann, B. (2007). On rectangular cartograms. *Computational Geometry*, 37(3), 175–187. DOI: 10.1016/j.comgeo.2006.06.
- Kruskal, J.B. (1964). Multidimensional Scaling by Optimizing Goodness of Fit to a Nonmetric Hypothesis. *Psychometrika*, 29, 1–27.
- K-SOL S.r.l. (n.d.). *ISO4APP API - Isochrones Map (Travel Time Map) and Isodistances Map*. [Application]. En ligne : www.iso4app.net.
- Lambert, N. (2020, 15 avril). COVID-19 : cartographie(s) d'un débordement. *Carnet (néo)cartographique*. En ligne : neocarto.hypotheses.org/10229.
- Langlois, P. (2003). Anamorphose par transformations pseudo-équivalentes. Dans *6èmes Rencontres de Théo Quant*, Besançon, France. En ligne : thema.univ-fcomte.fr/theoq/pdf/2003/TQ2003%20ARTICLE%2022.pdf.
- Mair, P., Groenen, P.J.F., de Leeuw, J. (2019). *More on Multidimensional Scaling and Unfolding in R: smacof Version 2*. [R package version 2.1-5]. En ligne : cran.r-project.org/web/packages/smacof/vignettes/smacof.pdf.
- Markowska, A. (2019). Cartograms – classification and terminology. *Polish Cartographical Review*, 51(2), 51–65. DOI: 10.2478/pcr-2019-0005.
- Nickel, S., Sondag, M., Meulemans, W., Chimani, M., Kobourov, S., Peltonen, J., Nöllenburg, M. (2019). Computing Stable Demers Cartograms. *Proceedings of the 27th International Symposium on Graph Drawing and Network Visualization (GD 2019)*, Průhonice/Prague, CZ. DOI: 10.48550/arXiv.1908.07291.
- Nusrat, S., Alam, Md.J., Kobourov, S. (2018). Evaluating Cartogram Effectiveness. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 24(2), 1077–1090. DOI: 10.48550/arXiv.1504.02218.
- Nusrat, S., Kobourov, S. (2016). The State of the Art in Cartograms. *Computer Graphics Forum*, 35(3), 619–642. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1605.08485>
- Olson, J.M. (1976). Noncontiguous Area Cartograms. *The Professional Geographer*, 28(4), 371–380. DOI: 10.1111/j.0033-0124.1976.00371.x.
- Pitch Interactive (n.d.). *Tilegrams*. [Application]. En ligne : pitchinteractiveinc.github.io/tilegrams/.

- Raisz, E. (1934). The Rectangular Statistical Cartogram. *Geographical Review*, 24(2), 292–296. DOI: 10.1111/cgf.12932.
- Rase, W.-D. (1981). Computer Graphics for Federal Planning in West-Germany. Dans *EUROGRAPHICS'81*. Eurographics. Darmstadt, DE. En ligne : www.wdrase.de/EUROGRAPHICS_81pp305-319.pdf.
- Rase, W.-D. (1997). Fischauge-Projektionen als kartographische Lupen. *Salzburger Geographische Materialien*, 1997, 115–122. En ligne : www.wdrase.de/Agit97.pdf.
- Ribeca S. (2018, 27 juin). Chart Combinations: Tile Grid Maps. *The Data Visualisation Catalogue Blog*. En ligne : datavizcatalogue.com/blog/chart-combinations-tile-grid-maps/.
- Roser, M. (2018). The map we need if we want to think about how global living conditions are changing. *Our World in Data*. En ligne : ourworldindata.org/world-population-cartogram.
- Sagar, B.S.D. (2014). Cartograms via mathematical morphology. *Information Visualization*, 13(1), 42–58. DOI: doi.org/10.1177/1473871613480061.
- Selvin, S., Merrill, D., Sacks, S., Wong, L., Bedell, L., Schulman, J. (1984). Transformations of Maps to Investigate Clusters of Disease. *Annual Meeting of the American Public Health Association*. Anaheim, CA, US. En ligne : escholarship.org/uc/item/7hc3n11x.
- Shepard, R.N. (1957). Stimulus and Response Generalization: A Stochastic Model Relating Generalization to Distance in Psychological Space. *Psychometrika* 22: 325–45.
- Spiekermann, K., Wegener, M. (1993). Zeitkarten für die Raumplanung. *Informationen zur Raumentwicklung*, 7, 459–487. En ligne : www.spiekermann-wegener.com/pub/pdf/IRPUD_API117.pdf.
- Sun, S. (2013). A fast, free-form rubber-sheet algorithm for contiguous area cartograms. *International Journal of Geographical Information Science*, 27(3), 567–593. DOI: 10.1080/13658816.2012.709247.
- Sun, S. (2020). Applying forces to generate cartograms: a fast and flexible transformation framework. *Cartography and Geographic Information Science*, 47(5), 381–399. DOI: 10.1080/15230406.2020.1745092.
- Tobler, W.R. (1959). Some Notes on Azimuthal Projections, *Student Paper*, Geography Department, University of Washington, Seattle, US, 6p. ronéotées.
- Tobler, W.R. (1961). Map Transformations of Geographic Space. Thèse de doctorat, University of Washington, Seattle, Washington, US, 196 p. En ligne : hdl.handle.net/1773/5629.

- Tobler, W.R. (1973). A Continuous Transformation Useful for Districting. *Annals, New York Academy of Sciences*, 215–220. DOI: 10.1111/j.1749-6632.1973.tb41401.x.
- Tobler, W.R. (1977). Bidimensional regression : a computer program. Santa Barbara, CA, US, 71 p. ronéotées.
- Tobler, W.R. (1979). A Transformational View of Cartography. *The American Cartographer*, 6(2), 101–106. DOI: 10.1559/152304079784023104.
- Tobler, W.R. (1986). Pseudo-Cartograms. *The American Cartographer*, 13(1), 43–50. DOI: 10.1559/152304086783900194.
- Tobler, W.R. (2004). Thirty Five Years of Computer Cartograms. *Annals of the Association of American Geographers*, 94(1), 58–73. DOI : 10.1111/j.1467-8306.2004.09401004.x.
- Vuidel, G. (2011). *Anaplaste*. [Logiciel]. En ligne : sourcesup.renater.fr/www/transcarto/anaplaste.
- Vuidel, G. (2021). *Darcy. Logiciel de transformation cartographique vectorielle*. [Logiciel]. En ligne : sourcesup.renater.fr/www/transcarto/darcy.
- Vuidel, G. (2013). *IsoDist/Angle*. [Logiciel]. En ligne : sourcesup.renater.fr/www/transcarto/isodist.