

Deux siècles de contributions cartographiques à l'analyse des interactions spatiales par les flux

Françoise Bahoken

▶ **To cite this version:**

Françoise Bahoken. Deux siècles de contributions cartographiques à l'analyse des interactions spatiales par les flux. Journée d'études : Flux réels versus flux immatériels : Contribution à la réflexion sur l'histoire des espaces, Oct 2016, Clermont-Ferrand, France. 19p. hal-01518424

HAL Id: hal-01518424
https://hal.science/hal-01518424

Submitted on 4 May 2017

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.

Deux siècles de contributions cartographiques à l'analyse des interactions spatiales par les flux

Françoise BAHOKEN

Université Paris-Est, AME, SPLOTT, IFSTTAR, F-77447, Marne-La-Vallée, France.
et UMR 8504 Equipe PARIS, Géographie-Cités, F-75006, Paris, France.
francoise.bahoken@ifsttar.fr

Mots-clés *: cartographie, flux, interactions spatiales, histoire*

1 Introduction

La cartographie de flux et de circulations observés dans l'espace géographique connaît aujourd'hui un regain d'intérêt par des publics variés, en témoigne la démultiplication d'images des réseaux ainsi décrits. Cette prolifération est liée à la progression de l'informatisation, à la production de nouvelles figures accueillies de manière réservée par la communauté scientifique non informaticienne. En effet, au-delà des critiques qui ont pu leur être formulées (Baron et al. 2012 ; Palsky, 2013 ; Jégou, Bahoken, 2016), c'est davantage la mise en scène graphique de ces nouvelles images qui explique leur popularité que leurs capacités analytiques. D'après Fairbairn et al. (2001), cités par M.-J. Kraak, les nouvelles possibilités actuelles de visualisation scientifique dépassent généralement le niveau de la création d'alternatives graphiques visuelles aux tableaux de valeurs « *Elle concerne également les méthodes et techniques qui sont derrière le traitement des figures, l'environnement* [informatique] *dans lequel les données sont utilisées (i.e. l'interface) et la réponse à la question 'Cela marche ?'*» (Kraak, 2003 : 393). Si les aspects techniques et technologiques sont aujourd'hui sous les feux de la rampe, il convient de ne pas perdre de vue qu'en l'absence de fondements théoriques sous-jacents à leur élaboration, les images ainsi générées ne sauraient être censées. D'après E. Tufte (1990), les caractéristiques structurelles qui sont aujourd'hui formalisées graphiquement ne permettent pas, dans l'ensemble, de produire une connaissance thématique. Autrement dit, nombre de ces nouvelles images véhiculées ne servent aucunement l'analyse qui peut en être réalisée, dans un contexte disciplinaire donné.

Et pourtant, l'étape de visualisation de résultats intermédiaires ou finalisés est complémentaire du traitement des données, en ce sens qu'elle va autoriser de (se) les (re)présenter de différentes manières, sous une forme graphique, statique ou dynamique par le biais d'une interface. Cette représentation graphique sous une forme simplifiée est légitime, étant donnée la complexité intrinsèque des données relationnelles. Elle nécessite aussi l'application d'une transformation de ses valeurs réalisée dans le cadre d'une modélisation graphique, d'une rhétorique et le jeu de symboles graphiques qui n'est pas seulement visuel. Par exemple, la visualisation efficace d'un réseau spatialisé donne à voir de manière symbolisée ses principaux motifs (*patterns*), souvent ceux qui sont *significatifs* dans le registre

théorique dans lequel elle s'inscrit. Elle n'en est qu'une représentation parmi d'autre élaborée en réponse à une question.

Considérant que la visualisation des données statistiques est étroitement liée à leur traitement d'ensemble, nous posons l'hypothèse générale qu'elle va participer à l'avancée de la connaissance. Pour la valider, nous considérons le cas particulier de l'analyse des interactions spatiales, en particulier par leur représentation sous la forme de carte de flux. Pour simplifier sa présentation, nous n'allons pas considérer les lieux intervenant dans la représentation des échanges. La seule cartographie des flux va se révéler suffisamment symptomatique du rôle joué par la carte dans l'analyse d'ensemble.

L'objectif est de montrer qu'en la matière et probablement plus qu'ailleurs, l'innovation méthodologique est le reflet d'une époque, de ses acquis théoriques et des possibilités techniques permettant leur validation empirique. Si cette seconde hypothèse considère une évolution conjointe de la figure et des outils qui y sont liés, elle reflète aussi le cadre théorique du moment.

Le développement d'une cartographie statistique des circulations, des flux et des mouvements participe en effet pleinement de la réponse apportée par les géographes aux critiques qui leur sont formulées dans la première moitié du XX^{ème} siècle à savoir : un renforcement de la prise en compte des mouvements spatiaux de toutes sortes dans l'analyse géographique (Haggett, 1973). C'est pourquoi la recherche géographique a progressivement identifié différents types de transferts dans l'espace dont il a bien fallu modéliser les processus et représenter les motifs sur une carte, par le truchement de variables visuelles formalisées asse tardivement.

La posture étant ancrée en géographie quantitative, nous présentons d'abord notre positionnement théorique en guise de prérequis. La contribution de la carte de flux aux différentes approches mobilisées dans le cadre d'analyse des interactions spatiales est ensuite exposée, selon que sa visée est descriptive, explicative puis visuelle.

2 Prérequis théoriques et méthodologiques

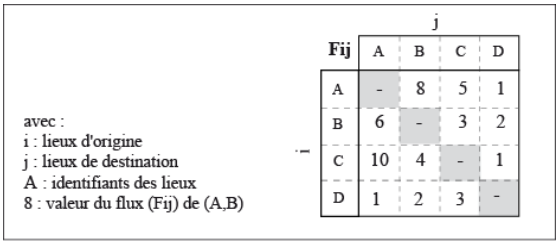
La définition des notions et concepts de l'analyse spatiale des interactions dans laquelle nous inscrivons notre propos étant susceptible de varier sensiblement en fonction de la discipline[1], nous présentons dans un premier temps l'information de flux dont il va être question dans le texte. La définition des notions et concepts va nous conduire à formaliser leur symbolisation et leur ancrage théorique.

[1] Cette affirmation fait suite à une discussion qui a eu lieu entre les participants, majoritairement historiens, mais aussi archéologues et géographes, lors de la journée d'étude dont la communication a servi de support à la rédaction de cet article.

2.1 L'information de flux

L'information de flux dont il est question est de nature statistique. Elle est archivée dans un tableau croisé formé de (*m*) lignes et de (*n*) colonnes définissant formellement une matrice de flux. Ses (*m,n*) dimensions correspondent respectivement aux (i,j) lieux d'origine et de destinatio formant la zone d'étude. La cellule (i, j) décrit un stock ou un effectif, une quantité (F) mesurable transférée entre (i) et (j). Ele décrit un flux, noté (Fij), illustré par la Fig. 1.

Figure 1. Présentation d'une matrice de flux



Ce flux est dit Origine-Destination (OD) et s'exprime en aspect direct entre (i) et (j). Cette précision est fondamentale dans le contexte de l'analyse des interactions spatiales. Considérer un flux OD signifie que l'acception de l'éloignement sous-jacent entre les couples de lieux (i,j) est une forme généralisée de la distance à vol d'oiseau (de la métrique euclidienne), en raison d'un besoin théorique de simplification de la mesure de la distance géographique (exprimée dans la réalité en kilomètres, par exemple), l'espace géographique n'étant pas isotrope.

Cela explique que la représentation cartographique de matrice, dans l'acception euclidienne générale de l'éloignement des lieux, se traduit sur la carte par un trait droit[2] (valué, orienté ou non). Nous avons pu montrer dans (Bahoken, 2016a) que ce trait symbolise en fait « *une distance cartographique* », *i.e.* la forme perçue sur la carte de la longueur du lien traduisant l'éloignement des lieux. Cette distance cartographique n'est donc pas nécessairement une distance visuelle ou une représentation de la distance empirique effectivement parcourue dans la réalité par le flux. Elle ne l'est, en réalité, que dans le cas où ce flux correspond à une représentation approximative d'un « *mouvement* », c'est-à-dire d'un flux considérant le cheminement parcouru dans l'espace géographique. Mais le cas général de l'information de flux dont on dispose est celui d'un flux agrégé dont on ne connait pas le cheminement exact, pour une raison qui tient au dispositif de mesure du flux. La donnée de flux résultant de procédures d'agrégation spatio-temporelles, les caractéristiques sémantiques des individus qui composent l'agrégat, de même que les caractéristiques spatiales et temporelles de leur(s) déplacement(s) ont été perdues dans l'analyse.

Cela étant, le flux OD est *réel* au sens de tangible (ou palpable) puisqu'il s'agit d'une quantité mesurable (de biens, de personnes, de déplacements et même d'information si on peut la mesurer en terme de fréquences ou de masse, *via* sa bande passante, etc.). Ce flux est dit *immatériel*, car sa

[2] Le fait d'incurver le trait, afin de le rendre plus esthétique ne change pas fondamentalement l'analyse à ce stade.

définition ne considère pas l'infrastructure de transport mobilisée qui sert de support au déplacement, il en découle que sa représentation graphique ne décrit pas *a priori* son cheminement exact. Parmi les différents types de flux envisageables, nous limitons notre propos aux flux *réels* et *immatériels*, ceux qui sont dits *non affectés sur réseau* dans le champs des transports ou *non planaires* au regard de la théorie des graphes.

Si le concept de flux revêt des acceptions variées souvent lié à son registre thématique (flux de biens, de migrants, de réfugiés, d'information, etc.), sa représentation (carto)graphique est invariante (Bahoken, Grasland, Zanin, 2016c).

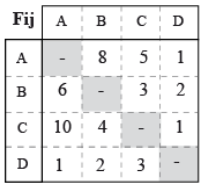
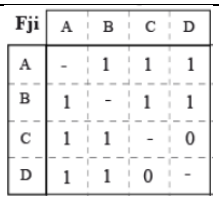
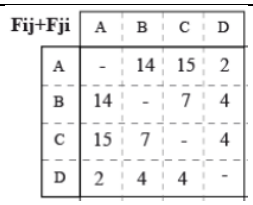
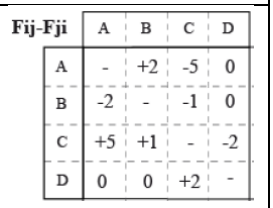
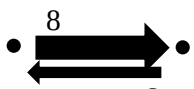
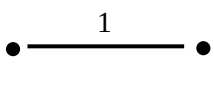
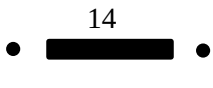
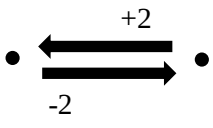
2.2 La représentation graphique d'un flux

La représentation de données de flux, y compris sous la forme de carte, n'est pas fonction de la thématique du flux, le procédé de représentant étant invariant de ce point de vue. Elle va plutôt varier dans sa construction en fonction du modèle graphique sous-jacent correspondant aux données, tous les graphiques n'étant pas adaptés à tous les types de données statistiques. Dans le cas des flux, trois modèles sont envisageables : la matrice, le diagramme lien-nœud (ou graphe) et la carte de flux (un graphe où les positions relatives des lieux les uns par rapport aux autres ne sont ni aléatoires ni liées au placement des liens).

Quatre principaux types de représentation des flux sont envisageables, selon le type de données, plus précisément, de matrice. Dit autrement, le choix de la méthode de représentation du flux est directement lié au caractère symétrique ou non des données par rapport à la diagonale principale de la matrice (Bahoken, 2016b). La Fig. 2 récapitule les trois principales possibilités de combinaisons selon les types[3] de matrices.

[3] La méthode de construction permettant de construire ces différentes matrices est présentée dans (Bahoken, 2016, 2016b).

Figure 2. Modalités de la représentation graphique d'un flux (ou d'un mouvement)

TYPE DE MATRICE				
Description				
Type	*asymétrique*	*symétrique*		*antisymétrique*
Notation	**(Fij)**	**(Lij)**	**(Fij^{+})**	**(Fij^{-})**
TYPE DE REPRESENTATION				
Description	*Echanges*	*Liaisons*	*Volumes bilatéraux*	*Transferts bilatéraux*
Procédé				
Description	*Lien valué orienté*	*Lien non valué non orienté*	*Lien valué non orienté*	*Lien valué orienté*
CADRE THEORIQUE				
Intitulé	*Théorie gravitaire*	*Théorie des graphes*	*Théorie gravitaire*	*Théorie gravitaire*
Type de raisonnement	*Logique de flux*	*Logique de liens*	*Logique de flux*	*Logique de flux*
Phénomène	*Interactions*	*Interrelations*	*Interactions*	*Interactions*

Ainsi, pour tout couple de lieux, selon qu'il soit caractérisé par un flux de type asymétrique, symétrique ou anti symétrique, pour représenter des échanges, des volumes ou des transferts bilatéraux, sa transcription graphique sera respectivement celle du lien valué et orienté (Fij), du lien non valué non orienté (Lij), du lien valué prenant la forme d'une bande (Fij^{+}), enfin du lien valué et orienté pour la (Fij^{-}). En pratique, les deux figurés symbolisant (Fij^{-}) étant identiques, mais de signe opposé, il est possible de n'en représenter qu'un seul : (Fij^{-}) > 0 ou bien (Fij^{-}) < 0, de manière à ne pas démultiplier inutilement le nombre de figurés présents sur la carte.

Ces différentes modalités de la figuration graphique du flux correspondent, chacune, à un cadre conceptuel défini qui va également induire le type de raisonnement cartographique réalisé ; une logique de représentation de laquelle va dépendre *in fine* le choix du figuré. La Fig. 2 est lisible de haut en bas et inversement, les aspects théoriques et le choix du type de matrice étant deux données d'entrée vers un objectif commun, tous deux participent d'un même processus général de construction cartographique du flux.

Dans ce contexte, considérant les seules hypothèses de la théorie gravitaire, l'analyse cartographique telle qu'elle est principalement menée notamment en géographie, en économie géographique ou démographie va relever d'une logique de flux. En fondant le cas général, ce raisonnement signifie que le processus de construction va mobiliser l'intensité des interactions, *i.e.* la valeur (Fij) du lien, aussi la variable rétinienne taille[4] pour générer un figuré valué (une bande) éventuellement orienté (une flèche). Elle diffère de la logique de liens fondée sur l'existence d'une liaison (Lji), figurée par un lien non valué de taille unique.

2.3 Le cadre théorique d'analyse d'un flux

L'analyse cartographique des flux appréhendée du point de vue du type de matrice relève en effet formellement de deux grandes approches théoriques : la théorie des graphes (*Social network analysis*) et la théorie gravitaire. Elles mobilisent respectivement une matrice d'adjacence (composée de 1 ou de 0) et une matrice de flux formée de valeurs réelles (voir Fig. 2) ; la seconde étant plus riche que la première qui peut être considérée comme une dégradation de l'information, en réduisant l'information (Fij) au lien (Lij).

Sur le plan graphique, cette différence se traduit par les deux formalismes graphiques : la théorie des graphes mobilise un lien de taille unique décrivant la connexité des lieux placés de manière aléatoire dans un plan (pour favoriser la visibilité des liens) ; la théorie gravitaire traduit l'intensité de la relation entre des lieux aux positions fixées par leur projection cartographique. Dans l'approche gravitaire, l'orientation du flux importe, tout comme la position relative des lieux, en raison de la richesse analytique liée à l'inscription des lieux dans un espace. En effet, alors que ce dernier est absent de la théorie des graphes (sauf à introduire visuellement une contrainte de position sur la localisation des sommets du graphe), l'approche gravitaire considère des sommets toujours localisés, des lieux dont la distribution n'est pas aléatoire, mais relèvent de la dynamique du système d'interactions dans lequel ils sont impliqués.

A noter que ces deux approches, assez complémentaires, sont de plus en plus hybridées, elles sont susceptibles de s'enrichir mutuellement dans la mesure où elles considèrent l'espace des échanges de manière fondamentalement différente : une logique de liens (symbolisé par un trait de largeur unique) et une logique de flux, ou de mouvements, (représentée par une bande, orientée ou non) ; la logique de lieux (représentée par un point symbolisant la position des lieux, ou une surface) étant généralement sous-entendue.

Cette typologie de méthodes de représentation de flux s'appuie sur différents symboles linéaires qui ont été en pratique progressivement introduits, à mesure que progressait l'analyse des interactions

[4] Le principe sémiologique d'application de la variable visuelle taille consiste à rendre la largeur du figuré linéaire proportionnelle à la valeur du flux qu'il symbolise, sa longueur étant déjà donneé par le système de projection cartographique.

spatiales et les besoins de leur représentation. Hormis l'époque actuelle que nous qualifions d'approche visuelle, l'analyse des interactions spatiales via les flux correspond à deux grands paradigmes que nous mobilisons pour structurer notre propos : l'approche descriptive et l'approche explicative menée sur les données numériques, c'est-à-dire en amont de l'étape de représentation.

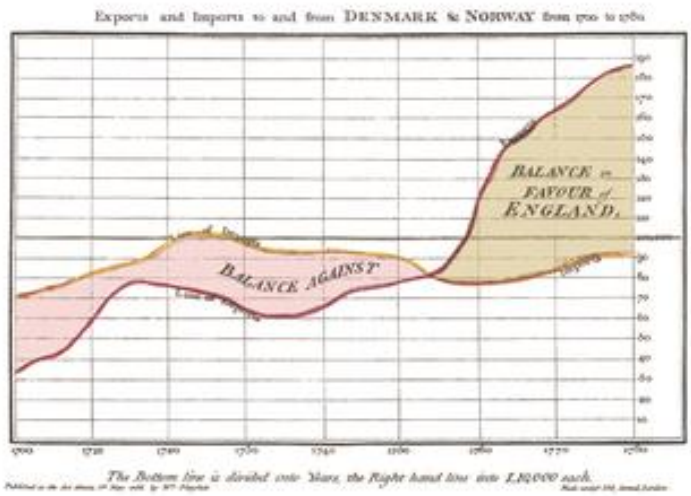
3 Approche descriptive de la cartographie de flux

L'approche descriptive de la cartographie de flux consiste à représenter directement les données observées, voire en mobilisant un traitement statistique uni varié. Elle vise, par exemple, à calculer différents indicateurs descriptifs ou bien présélectionner des valeurs au préalable de leur représentation. Cette pratique est directement liée à l'analyse des données statistiques.

3.1 Les prémisses de la représentation des flux (1836-1845)

Ce n'est probablement pas un hasard si le premier graphique statistique reconnu comme tel avait pour ambition de représenter des données de flux. Le diagramme proposé en 1786 par William Playfair (1759-1823), considéré comme l'inventeur de la statistique graphique, est réalisé à partir d'une matrice de type (Fij), le type de flux variant en fonction de leur orientation. Il représente l'évolution des échanges commerciaux bilatéraux entre le Danemark et les Pays-Bas, de 1700 à 1780 (voir Fig. 3).

Figure 3. Le premier graphique statistique (Playfair, 1786)



La nouveauté de ce graphique, réalisé en deux dimensions, est de privilégier la représentation des quantités exportées (courbe rouge) et importées (courbe jaune), sur l'axe des ordonnées et leur temporalité (en abscisses). Il ne considère pas de localisations, ce qui est logique.

D'après Gilles Palsky (2004b), la carte statistique ne sera introduite qu'en 1826 par C. Dupin, ouvrant la voie vers une production graphique importante réservée aux cartes d'états. Ce n'est que vers 1837, qu'une cartographie des échanges va pouvoir se développer, à la faveur des travaux d'ingénieurs français et anglais. « *Dès 1830, on passe à la cartographie des ingénieurs car eux-mêmes avaient*

besoin de connaître la répartition de la population pour décider par exemple des futurs tracés des voies ferrées » (Désiré, 1991 : 445, cité par G. Palsky), ces derniers nécessitant de combiner des données variées afin de prendre en compte le contexte de l'infrastructure (Palsky, 1996, 2004b).

Les premières cartes de flux réalisées vont en effet décrire un trafic sur un réseau de transport, elles vont représenter des flux *matériels*. La carte emblématique de cette période est réalisée par H. D. Harness en 1836, pour accompagner le second rapport de *l'Irish Railway Commissionners* publié en 1838.

Sur le plan graphique, il est important de noter que cette carte est la première qui utilise la variable visuelle taille, pour des données de flux et cela, avant même qu'elle n'ait été mobilisée pour des cartes d'états. Elle introduit par ailleurs le procédé des flux affectés sur réseau (ou serpent de charge) qui consiste à plaquer directement sur l'infrastructure physique la valeur de flux correspondante, l'infrastructure servant alors de fond de carte. L'information sous-jacente étant de type (Fij^{+}), elle est représentée par des bandes de tailles variables, décrivant la décroissance du trafic de passagers au départ du Dublin.

S'ouvre ensuite une période fructueuse de cartographie directe de ces flux *matériels* qui va s'inscrire dans un courant général de statistique graphique. D'après H. Robinson (1955), c'est entre 1835 et 1955 que les techniques de représentation des données quantitatives décrivant des effectifs ont été introduites. D'abord sous la forme de carte par points (1830), puis de cartes en aplats ou choroplèthes (dicrète), puis de carte en isolignes (1882) continues par interpolation et, enfin, de carte de flux en implantation linéaire (voir Fig. 4).

Figure 4. Evolution des méthodes de représentation graphique des flux

Ces méthodes de représentation caractérisent le processus général de cartographie statistique, elles sont également applicables aux flux puisqu'ils peuvent être appréhendés soit du point de vue des lieux, c'est-à-dire selon une logique de lieux pour représenter l'effet des flux sur leur distribution, soit du point de vue des interactions (voir Fig. 1).

Les cartes de flux *matériels* peuvent être considérées comme un cas particulier de carte de flux *immatériels*, pour lesquelles le cheminement entre les OD est connu avec précision, grâce à la connaissance du mode de transport. Sur le plan cartographique, cette précision entraîne, un changement de mode d'implantation spatiale.

En effet, le fond de carte des flux *matériels* servant de support à la représentation est l'infrastructure dans son tracé exact (le réseau routier, par exemple) ; il est en implantation spatiale (poly)linéaire. Son

implantation n'est donc pas ponctuelle, à l'instar de celle des flux *immatériels* dont fond de carte est un réseau « virtuel » formé par la mise en relation du semis de lieux d'OD. A noter, dans ce cas, que l'implantation peut également être surfacique si et seulement si, à une échelle géographique donnée, un et un seul point peut être affecté à chacun des polygones du semis.

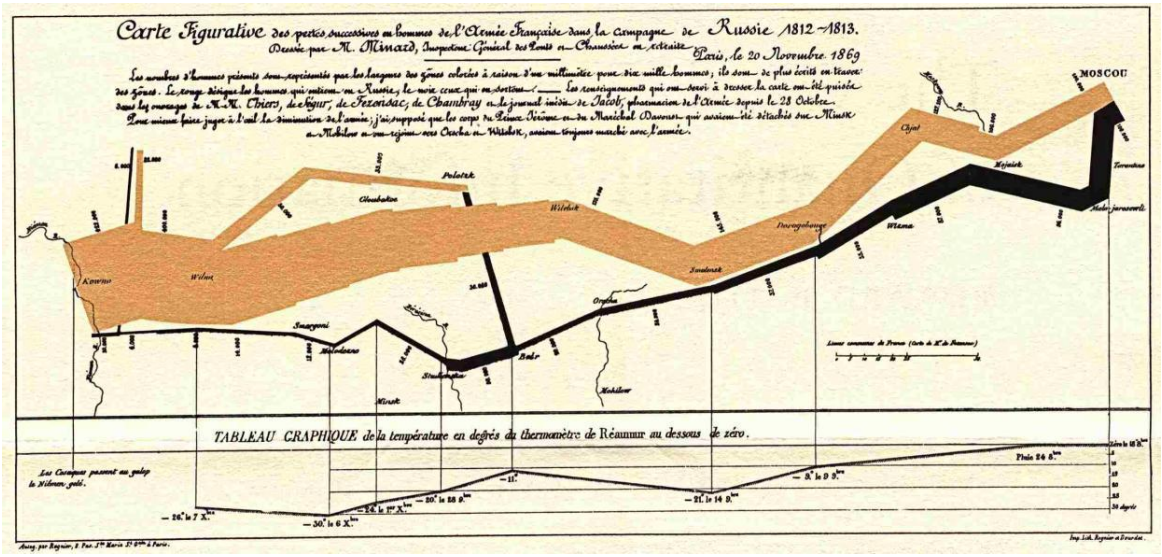
L'objet cartographique associé à la représentation d'un flux *matériel* est linéaire alors que celui d'un flux *immatériel* est ponctuel : le premier figurant donc un trafic et le second un flux ordinaire. Ces deux types d'implantation spatiale relèvent comme précédemment de corpus théoriques différents : l'infrastructure sous-entend un lien caractérisant un réseau dit *planaire* ; il mobilise des méthodes spécifiques de modélisation des transports (pour estimer par exemple un trafic du point de vue de l'offre ou de la demande de transport), d'optimisation par l'étude des possibilités de cheminement dans le graphe correspondant. A l'inverse, un flux ordinaire (*immatériel)* est non affecté sur réseau, en n'étant pas lié dans sa définition à un mode de transport, il ne saurait l'être dans sa représentation. C'est pourquoi le lien qui décrit un flux entre une paire de points présente un aspect direct sur la carte et non sinueux ; il fait par ailleurs référence à la métrique u vol d'oiseau (à la distance euclidienne comme forme générale de simplification de la distance géographique parcourue dans la réalité).

Les flux *matériels* et *immatériels* sont bien deux concepts fondamentalement différentes. Aussi allons restreindre notre exploration historique aux flux ordinaires. Cela étant, le fait que les premières cartes de flux aient été réalisées par des ingénieurs des transports dans les années 1830-1840 n'est pas anodin dans la représentation des échanges. Celle des flux *immatériels* en est directement issue, en s'inscrivant à leur sillage : l'âge d'or de la cartographie de flux qui suit les prémisses graphique consacre en effet le procédé distributif introduit par Charles-Joseph Minard.

3.2 L'âge d'or (1845-1885)

Si la première carte de flux décrit des trafics routiers, leur procédé spécifique des flux affectés sur réseau va se généraliser quelques années plus tard, sous la forme de carte distributive de flux *immatériels* avec les travaux de Minard. Au moment où Harness publie sa carte, Minard, un ingénieur français des Ponts et chaussées débute une nouvelle carrière dédiée à la cartographie statistique. Son apport est tel qu'il caractérise l'âge d'or de la cartographie de flux en tous genres, emporté par l'enthousiasme général autour de la cartographie statistique (Palsky, 1996). Le plus célèbre des documents qu'il réalise, alors qu'il est déjà retraité, est présenté sur la Fig. 5.

Figure 5. La campagne napoléonienne de Russie (Minard, 1869)

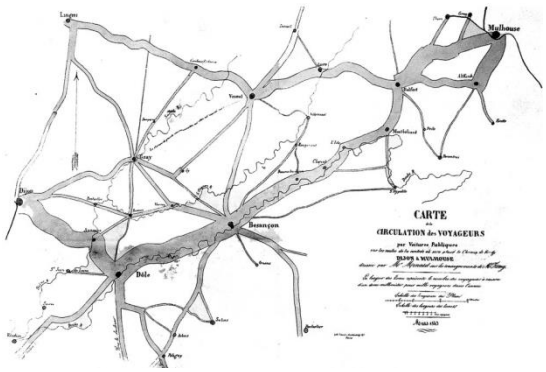
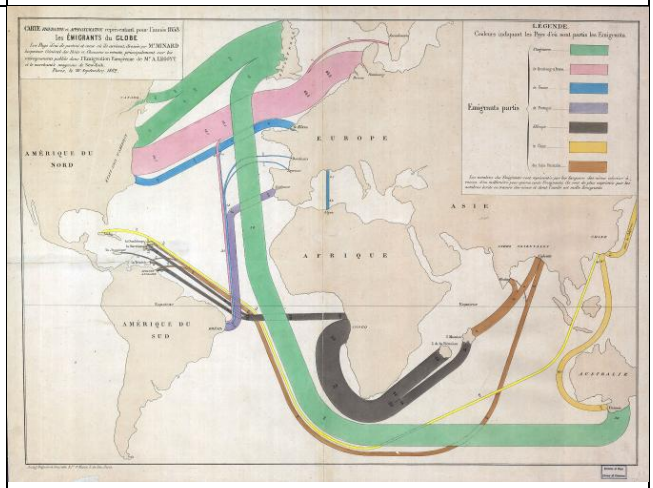


Réalisée à partir d'une matrice de type (Fij), cette *Carte figurative des pertes successives en hommes de l'armée française dans la campagne de Russie, 1812-1813* illustre la tragique réduction des effectifs de cette armée avec le temps (au bas du graphique) aux différents tronçons (tracés entre des localités). Cette représentation s'apparente à une trajectoire, le tableau sous-jacent décrivant la succession de lieux pratiqués par l'armée (l'effectif servant à dimensionner la largeur du tronçon entre 2 lieux), dont on notera que leur enchaînement n'est pas identique à l'aller et au retour.

C'est la richesse de cette construction, son « […] *niveau de sophistication extraordinaire pour son époque* » (Robinson, 1982) qui a contribué à étendre son domaine d'application des flux *matériels* aux flux *immatériels*, des Sciences pour l'ingénieur aux Sciences humaines et sociales. Elle fait aujourd'hui l'unanimité dans une large communauté de graphistes. Il faut dire que le procédé est astucieux.

La Fig. 6 compare deux cartes réalisées selon ce procédé, pour représenter un trafic régional de passagers par voie routière soit des flux *matériels* (6a) et pour représenter des migrations internationales par des flux *immatériels* (6b). Si le procédé graphique est similaire, la proximité visuelle effective, les deux cartes représentent deux types de flux (voir Fig. 2), (6a) décrirait un volume bilatéral de trafic (Fij+) alors que (6b) décrirait des échanges orientés (Fij) et non seulement un volume, Minard ayant introduit en sus la variable visuelle couleur pour préciser l'origine des immigrants (voir infra).

Figure 6. Cartes de flux matériels et immatériels distributives

a) *Carte de la circulation des voyageurs par voitures publiques sur les routes de la contrée où sera placée le chemin de fer de Dijon à Mulhouse*.	*b) Carte figurative et approximative représentant pour l'année 1858 les immigrants du globe,* réalisée en 1862
	

Cette carte (6b) est symptomatique des apports majeurs de l'auteur à une cartographie descriptive des flux, elle en regroupe quatre à savoir : *i)* la généralisation de la variable visuelle taille (largeur des bandes) pour la représentation des flux immatériels ; *ii)* l'utilisation de la variable visuelle couleur (variations de teinte) pour discriminer les échanges en fonction de l'origine des migrants, en recourant à une palette de couleurs symbolique (les « bandes » des immigrants depuis la France sont teintées de bleu, depuis l'Afrique en noir, depuis la Chine en jaune) ; *iii)* l'introduction d'une astuce graphique pour gérer le chevauchement des figurés par des tirets, suggérant une variable visuelle transparence qui sera introduite plus d'un siècle plus tard ; *iv)* la généralisation du procédé distributif aux flux immatériels.

Ce procédé est si efficace qu'il sera ensuite généralisé aux graphiques non localisés, popularisé sour la dénomination de diagramme Sankey, en référence à Matthew H. P. R. Sankey, un ingénieur irlandais et contemporain de Minard rendu célèbre par la publication d'un tel graphique dans une minute de l'organisme des Ingénieurs en mécanique en 1898.

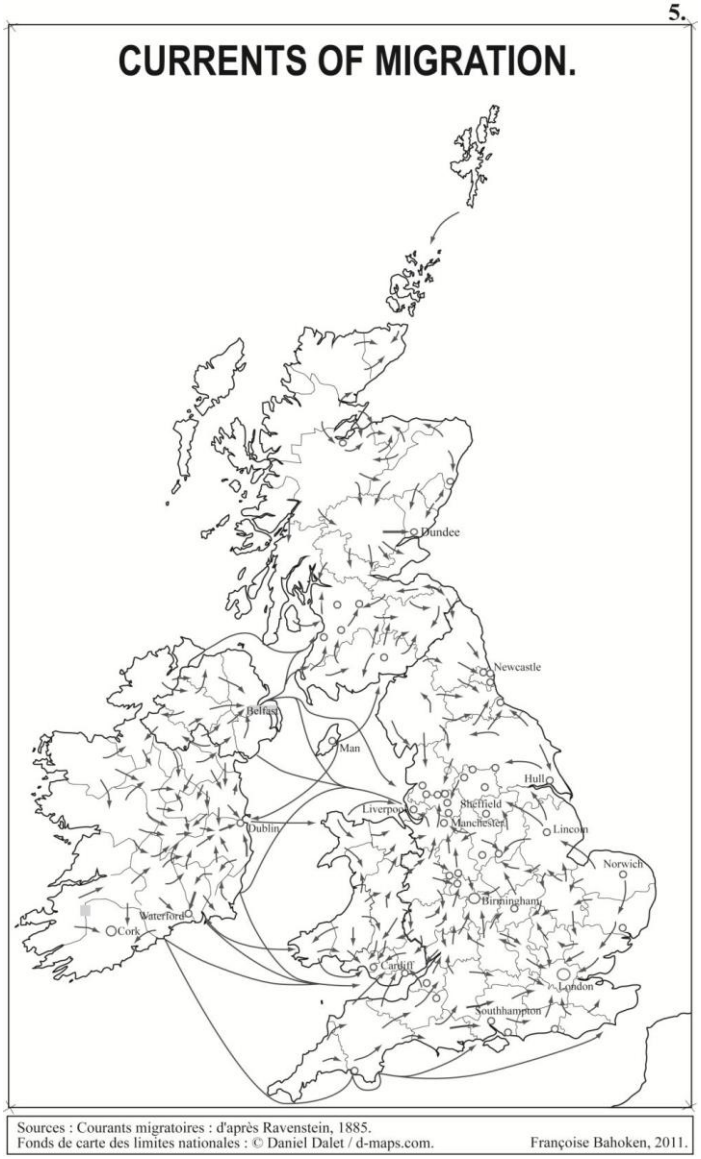
Si Minard a utilisé la couleur pour suggérer la provenance des migrants, c'est bien que l'orientation des flux est une donnée centrale dans l'analyse des interactions. Dans les mêmes années s'impose en effet de façon quasi universelle le procédé graphique de la flèche, il apparait la première fois sur une carte de flux *immatériels* illustrant des hypothèses empiriques.

Dès lors la cartographie de flux ne va plus seulement servir à décrire des données, elle va revêtir de nouveaux habits, une visée exploratoire pour illustrer des hypothèses, accompagner le développement de la recherche sur les interactions spatiales.

3.3 Le premier tournant (1885-1889)

Le tournant se produit incontestablement en 1885, avec la première présentation des Lois de la migration par Ernst Georg Ravenstein, géographe et cartographe allemand de la *Royal Geographical Society (RGS)*. Ces lois sont illustrées par douze cartes toutes choroplèthes à l'exception de l'une d'entre elles, la carte n°5 (voir Fig. 7).

Figure 7. La première carte de flux réalisée avec des flèches



La formalisation de ces lois résulte d'une démarche intuitive de l'auteur fondée sur l'analyse de données du recensement de population britannique pour invalider une hypothèse : l'allégation de Farr (1876), à l'époque Président de la *Royal Statistical Society* (RSG) de Londres (1871-1873) selon laquelle les migrations humaines se produiraient de manière non structurée, c'est-à-dire sans loi apparente (Ravenstein, 1885 : 167).

La carte n°5 a une apparence pour le moins énigmatique tant dans sa construction que dans sa dénomination. Elle rompt avec les pratiques des contemporains de l'auteur. Elle n'est plus seulement

descriptive et statique. Elle représente un phénomène dynamique, un solde bilatéral (Fij-) et pour cela, introduit un nouveau procédé graphique en mobilisant plusieurs ensembles de flèches (Bahoken, 2013).

Elle permet aussi d'illustrer différentes échelles de la mobilité, locales et régionales, l'un des déterminants de ces mouvements migratoires de travailleurs. Leur concomitance illustre par ailleurs deux approches de l'analyse cartographique des flux : l'une discrète fondée sur un maillage territorial (celui des comtés) et l'autre continue.

En focalisant ainsi l'attention du lecteur sur différentes échelles, l'auteur introduit *via* la représentation les concepts fondamentaux de l'analyse spatiale : le rôle de la distance parcourue (1ère loi), en lien avec l'attractivité des lieux (le rôle de leur masse, symbolisé par des formes variées). Ces notions, couplées au 2ème et 3ème lois portant sur le caractère *push-pull* des migrations entre espaces ruraux et urbains seront à l'origine de la formulation gravitaire des modèles d'interaction spatiale (Ravenstein, 1885 : 186-187). S'ouvre alors une époque focalisée sur la recherche de variables explicatives des interactions spatiales.

4 L'approche explicative

L'approche explicative de la cartographie de flux consiste à représenter les motifs sous-jacents des flux, ceux qui ne sont directement observés. Leur identification résulte de la mise en œuvre de méthodes d'analyse statistiques bi variées et multivariées dans le cadre d'une modélisation numérique. Dans ce registre, la thèse de M. Poulain (1981) présente un historique de l'évolution de la formulation mathématique des migrations selon l'analogie gravitaire, mais elle de discute pas des aspects de représentation, ces derniers intervenant dans un second temps, après le transfert effectif des lois physiques.

4.1 Le transfert des lois de la physique à la géographie (1934)

En 1934, Charles Warren Thornwaite (1934) présente une monographie sur les migrations internes américaines. L'originalité de ce travail tient dans le choix du sujet (l'auteur est surtout connu en géographie physique : climatologie et hydrologie) et dans la nouveauté de ces cartes statistiques. Il faut dire que l'époque connaît en engouement pour la visualisation statistique des données, l'ouvrage *Graphic Presentation*[5] (Brinton, 1939) publié en l'honneur de Playfair en est une riche illustration. Se développe aussi indépendamment de celle des flux une pratique de représentation des réseaux des relations à l'échelle mondiale, à faveur d'une ère de la géographie aérienne qu'il n'est hélas pas possible de développer.

[5] Une version allégée de ce document est disponible à l'adresse suivante : *http://www.archive.org/details/graphicpresentat00brinrich*. Voir notamment les pages 216 à 230 pour les cartes de flux.

Tobler (1995) précise que si Thornwaite référence son propos en physique, c'est en raison de son attrait pour les sciences de la terre et l'économie, en particulier les analyses de type coût-bénéfice. Son mémoire « […] *mérite un examen attentif car la cartographie relève du challenge* » (Tobler, 1995 : 329). Elle présente de nombreuses cartes de flux mobilisant des notions de physique électrique de champs de pression, de gradients et de potentiel. « *Ce qui est important dans les migrations est l'inverse de la relation de résistance, à la fois physique et culturelle, qui est rencontrée.* […] *Les flux de population sont ainsi, en quelque sorte, analogues aux flux d'électricité, la formulation mathématique qui en découle pour les migrations mérite une précision* [% suivant]. Le total des migrations d'une zone à une autre est directement proportionnel à la pression du gradient entre elles, et inversement proportionnel à la résistance* » (Thornwaite, 1934 : 1).

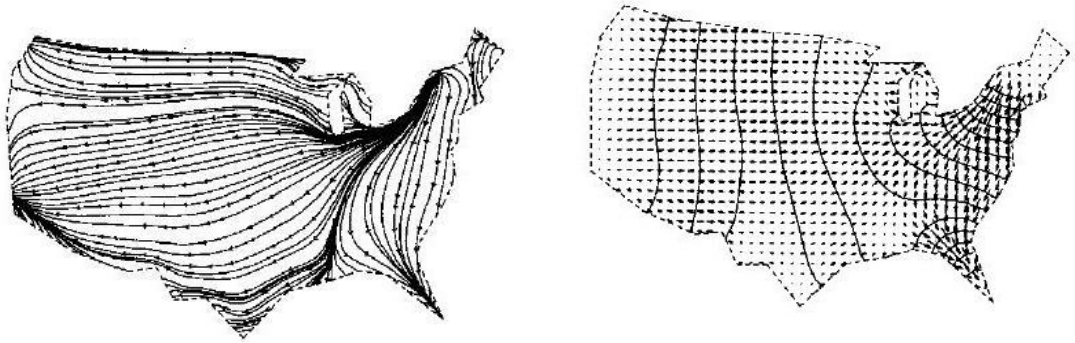
Vont ensuite s'écouler de longues années qui serviront à calibrer les différentes versions des modèles d'interaction spatiale (Poulain, 1981), leur représentation étant classiques (Pumain, 1986). De nouvelles méthodes de cartographie interviendront dans un second temps, bien après le tournant spatial de la géographie des années 1970 auquel participent la publication des principes de la sémiologie (carto)graphique (Bertin, 1967), le développement des outils de Système d'Information Géographique et deux références académiques bien que non spécifiques à la cartographie : la première est celle de John D. Nyusten et Michael F. Dacey (1961) qui va introduire une nouvelle méthode d'analyse (carto)graphique de flux *immatériels* de communications téléphoniques fondée sur la théorie des graphes ; la seconde est la traduction en 1973 en français de l'ouvrage *L'analyse spatiale en géographie humaine* de P. Haggett (1965). La proposition de Ravenstein (1885) correspond à l'amorce la première tentative du transfert de principes physiques à l'analyse spatiale qui vont être véritablement transférés à la carte dans les années 1980, marquant un second tournant.

4.2 Le second tournant quantitatif de la cartographie de flux (1981, 1983)

En 1981, l'économiste Lucas ouvre la voie vers un profond renouvellement de la cartographie de flux, en reprenant les fondements des recherches de Thornwaite. Il comparer à son tour la migration à un courant électrique : c'est « […] *un ajustement du flux* [qui] *répond à des différentiels de pression qui se manifestent à l'opposé, à la fin du pipeline. Cette idée suggère que ce n'est pas le niveau absolu de pression ni de poussée qui est en cause, mais l'existence d'une relative attraction entre les éléments* ». (Lucas, 1981 : 85, cité par Tobler, 1995 : 329).

Quelques auteurs proposeront par la suite des cartes de flux fondées sur des méthodes de représentation résolument innovantes, la complexité de certaines d'entre elles étant toujours d'actualité. Les propositions de Diego Dorigo et Waldo Tobler font partie de celle-là, lorsqu'ils recourent aux notions de pression et de gradient pour représenter des flux financiers sous la forme de champs vectoriels et de potentiel (Tobler, 1981 ; Dorigo et Tobler, 1983). Sur la Fig. 8, les champs migratoires sont représentés par des flèches d'iso-potentiels, ce qui constitue une première nouveauté.

Figure 8. Champs migratoires

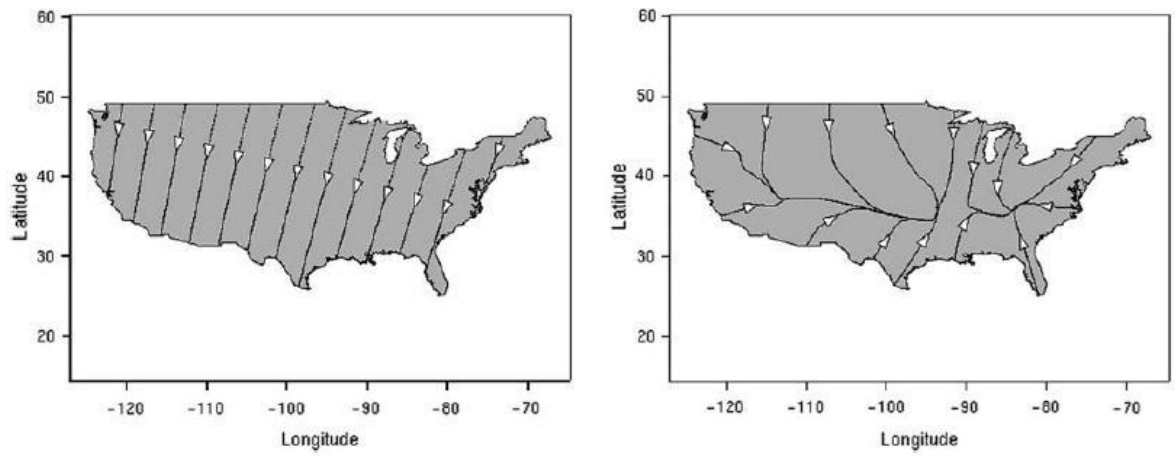


Source : D. Dorigo, W. Tobler (1983).

Une seconde nouveauté tient à l'adoption d'un modèle de représentation continu supposée fournir un bon résumé de la structure spatiale des échanges (Tobler, 1987 : 157). Cette continuité de l'espace associée à la direction préférentielle des transferts nets (Fij^{-}) mobilise à nouveau astucieusement l'orientation dans la représentation de la tendance des échanges.

Le besoin d'estimation de l'orientation générale des flux a popularisé l'usage de traitements statistiques variés en amont des représentations, notamment le recours par exemple à « […] *un modèle statistique probabiliste de vraisemblance locale plutôt qu'un modèle de champ de potentiel pour estimer l'orientation des flux* » (Brundson, Charlon, 2006 : 138). Ainsi pour tout lieu d'origine (i), la probabilité directionnelle correspond à la moyenne pondérée localement des directions de l'ensemble des flux (voir Fig. 9). La représentation des iso-lignes directionnelles est combinée ici à une méthode de lissage cartographique pour suggérer, à nouveau, différentes échelles du système migratoire.

Figure 9. Directions préférentielles des échanges



Source : Brundson, Charlon (2006)

La publication des cartes de cette période marque un second tournant caractérisé par le transfert au niveau de la représentation de cette acception continue de l'espace déjà présenté. Il sera mis notamment mis œuvre par le truchement de procédures d'interpolation spatiale. Sur le plan théorique, ces méthodes permettent de résoudre différents problèmes liés à l'incomplétude des données, à

compenser d'éventuels effets de bords aux frontières externes de la zone d'étude, aussi à représenter des tendances globales et locales.

Elles inscrivent aussi la représentation de flux dans le dispositif analytique des interactions spatiales. C'est d'ailleurs dans ce contexte que les lois empiriques de la migration énoncées par Ravenstein ont pu être formalisées (Tobler, 1987 : 157). Et la boucle est bouclée, du moins pour un certain temps.

5 Conclusion : vers une approche visuelle ?

Depuis la carte de Ravenstein, les travaux de Tobler ont conduit à des avancées théoriques et méthodologiques majeures en matière de cartographie statistique de flux. Pour mettre en œuvre ses propositions, l'auteur a développé différents outils ayant par ailleurs contribué à l'émergence d'une nouvelle discipline dans les années 1970 : la géomatique.

La géomatique, science de l'information géographique, prend son essor dans le contexte du développement de l'informatique, de sa généralisation comme outil de traitement cartographie puis de géo visualisation dynamique sur support écran. Mais elle participe tardivement à la mouvance exploratoire des données statistiques localisées, à cette nouvelle ère visuelle structurée autour de l'Informatique graphique (*InfoViz*).

L'engouement généralisé que *l'Infoviz* suscite depuis 2010 conduit à un renouvellement indéniable des possibilités graphiques, aussi à leur standardisation. Cependant, peu d'entre elles portent sur des flux. Et pourtant, on pourrait espérer que le regain d'intérêt pour la visualisation des réseaux, en particulier la prise en compte de l'espace dans l'analyse des réseaux sociaux à travers le concept de réseau spatial (Barthelemy, 2010) profite également aux flux. Elle participe en réalité à l'actualisation numérique d'anciennes productions, plutôt qu'à leur création *ex nihilo*.

Les nouvelles productions graphiques suscitent en effet davantage la fascination qu'un intérêt analytique, elles limitent à la promotion de la valeur esthétique d'une technique. « *En réalité, passé l'émerveillement, le géographe ou cartographe est souvent déçu* » (Palsky, 2013), quand bien même la prouesse technique est toujours saluée. M. Baron et al. (2012) indiquent qu'elles témoignent de « […] *l'appropriation de l'outil cartographique par des acteurs qui n'ont pas fait l'effort de s'y former méthodologiquement et théoriquement. Car la représentation juste d'une telle quantité de données sur un si grand espace n'est pas chose aisée. C'est même un tour de force cartographique*. […] » (Baron et al., 2012).

Cela étant, les processus[6] à l'œuvre sont susceptibles d'ouvrir la voie vers de nouvelles pratiques, certains néo cartographes se situant de plus en plus à l'interface des géographes et des informaticiens.

[6] On peut citer les trois processus suivants : *i)* l'explosion de masses de données (*big data*) libres *ii)* le contexte d'ouverture apparente (*opendata)* des données ; *iii)* les progrès algorithmiques réalisés en InfoViz, dans le champs de la visualisation de données notamment interactive.

Pour autant, il est important de noter que ces nouveaux outils ne modifient la figure que dans son apparence visuelle, dans son esthétique remise au gout du jour et non dans son fondement. Ces néo-cartes sont bien souvent le miroir de figures anciennes réalisées au début du XX^{ème} siècle pour l'essentiel manuellement. La Fig. 10 présent en vis-à-vis des cartes similaires réalisées à près d'un siècle d'intervalle.

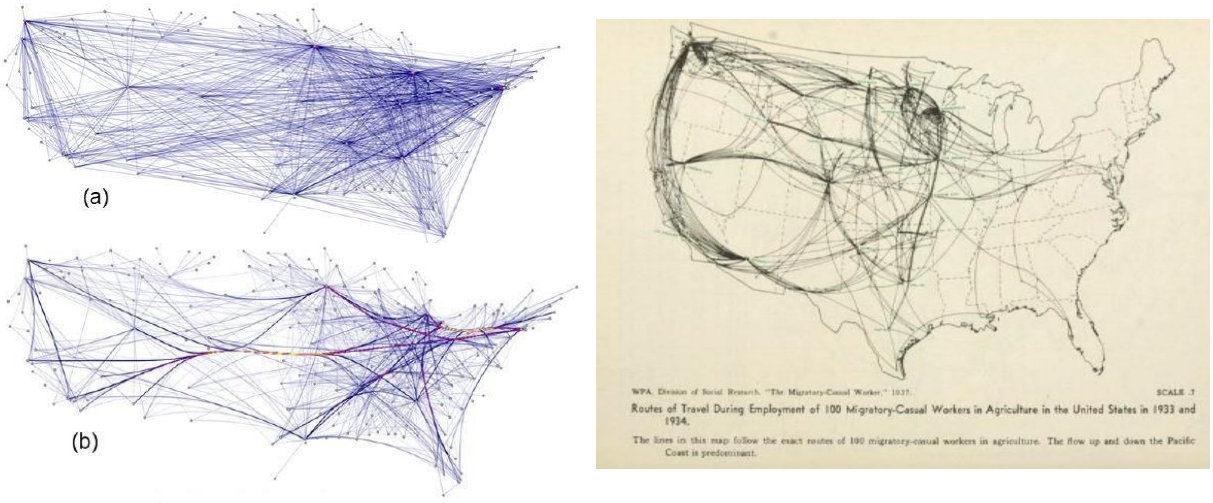


Figure 10. Une figure persistante de la cartographique de flux, la simulation de routes

(c)

Source : D. Holten et J. Van Wijk (2009) Source : W.-P. Brinton (eds.) (1939)

La carte (c) décrit, d'après la légende, les routes exactes de flux travailleurs agricoles saisonniers des années 1930 : les flux longeant la côte pacifique en montée et descente sont prédominants, de même que ceux du nord-est structurés par le pôle dominant de Chicago, véritable centre d'attractivité économique de flux variés à l'échelle nationale. (b) décrit le résultat de l'application d'une méthode innovante de fusion graphique des liens présentées en (a). Si (b) décrit moins de motifs que (c), il est intéressant de noter qu'elle présente des motifs spatiaux similaires, en l'occurrence le rôle joué par la méga région de Chicago.

Dans les deux cas, l'objectif est de donner à voir une densité importante de « routes » en incurvant les tracés linéaire. (b) et (c) révèlent ainsi des routes préférentielles symbolisées par une densité de fréquence importante de figurés autour de centralités qui vont logiquement différer suivant la thématique du flux, sauf pour celles qui sont dominantes (Chicago). La ressemblance de ces deux cartes étant avérée, force est de reconnaître la prouesse technique qui remet au gout du jour cette ancienne méthode. Ce constat n'est pas anodin.

Le procédé de fusion graphique présente l'intérêt d'éviter de sélectionner *a priori* les figurés à représenter, aussi de simuler la perception d'un mouvement réalisé dans un espace géographique. Cette possibilité est fondamentale dans le registre de la représentation des interactions spatiales.

Sur la Fig. 10, la variation du motif des cartes l'est en raison de la thématique, ce qui est logique, elle l'est dans la réalité du fait des rugosités topographiques, des multiples freins aux déplacements dans l'espace géographique, quelle que soit l'échelle d'observation. Le choix de tracés curvilignes entraîne ici une généralisation de l'information, la visualisation de l'orientation générale des déplacements à l'échelle américaine, une approximation graphique des routes empruntés et non leur cheminement réel, indépendamment de l'échelle considérée.

En effet, « *Il ne suffit pas de tracer les itinéraires réellement parcourus pour représenter un système de relation »* (Bertin, 1973). Encore faut-il que cette symbolisation soit sensée. Cette assertion repérée en légende d'une planche représentant des flux commerciaux de blé suggère deux grandes possibilités d'analyse, *a fortiori* de représentation des interactions spatiales. Elles se distinguent dans la manière dont elles appréhendent l'espace. L'approche gravitaire, en mobilisant différentes proximités des lieux dans sa formulation, considère intrinsèquement dans sa modélisation le rôle joué par l'espace. Lorsqu'elle est cartographiée, cette approche considère soit l'itinéraire et ses détours, lorsque le cheminement exact parcouru entre les lieux est connu, ce qui n'est pas toujours le cas, soit une acception de l'intensité pondérée par une friction. L'approche gravitaire n'est de ce fait pas réduite à l'analyse du seul réseau de relations entre des lieux (logique de lien), symbolisé par un trait droit, fusse t'il valué (logique de flux) et habillé d'un fond de carte. Si elle considère l'espace dans sa modélisation, qu'en est-il de sa représentation ?

Nous faisons l'hypothèse que cette possibilité est susceptible d'ouvrir la voie vers la prise en compte de l'espace dans la représentation des interactions spatiales et non seulement dans leur modélisation, ouvrant potentiellement la voie vers une nouvelle approche de représentation des flux, sous la forme de mouvement.

Références mentionnées

Tous les liens ont été vérifiés le 30/03/2017.

Bahoken, F. (2013), A propos de la première carte de flux qui figure des flèches (Ravenstein, 1885), *Confins, revue franco-brésilienne de géographie*, n°17. URL *http://confins.revues.org/8187*

Bahoken, F., (2015), Éléments pour une représentation (carto)graphique des matrices de flux, *M@ppemonde*, n°115, *http://mappemonde-archive.mgm.fr/num43/articles/art14304.html*

Bahoken, F. (2016a) *Contribution à la cartographie d'une matrice de flux*, Thèse de doctorat en géographie, Université Denis Diderot (Paris 7), 591 p. URL : *https://halshs.archives-ouvertes.fr/tel-01273776*

Bahoken, F., (2016b), L'approche cartographique de la décomposition des matrices de flux, *M@ppemonde*, n°116. *http://mappemonde-archive.mgm.fr/num44/articles/art14404.html*

Bahoken, F., Grasland, G., Zanin, C., (2016c), D'une cartographie de flux à une cartographie de mouvements. Aspects sémiologiques. In : La sémiologie dans tous les sens, *Cartes et géomatique, Revue du Comité français de cartographie*, n° 229-230 - Septembre - Décembre 2016, pp.65-74.

Bertin, J. (1967), La représentation du mouvement dans le plan, in : Bertin J., *Sémiologie graphique*, Gauthier-Villars, Paris, pp. 342-355.

Brundson C., Charlton M. (2006), Local trend statistics for directional data – A moving window approach, *Computer, Environment and Urban Systems*, vol. 30, pp. 130-142.

Dorigo G., Tobler, W. (1983), Push Pull Migration Laws, *Annals of American Association of Geographers*, vol. 73, n°1, pp. 1-17.

Haggett, P., (1973), *L'analyse spatiale en géographie humaine*, Armand Colin, 390 p.

Fairbairn, D. (2006), Measuring Map Complexity, *Cartographic Journal*, vol. 43, n°3, pp. 224 - 238.

Harness, H. D. (1838), *Atlas to Accompany the Second Report of the Railway Commissioners*, H.M.S.O, Dublin, Ireland

Palsky, G. (1996), *Des chiffres et des cartes. Naissance et développement de la cartographie quantitative française au XIXème siècle*, Rapport du Comité des Travaux Historiques, Ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche Paris, Mémoire de la section de géographie, n°19, 331 p.

Palsky, G. (2004a), Le temps des cartographes, in : Bord J.-P., Baduel, R., *Les cartes de la connaissance*, Karthala-Urbama, pp. 345-352.

Palsky, G. (2004b), Le calcul par l'oeil, in : Bord J.-P., Baduel, R. (dir.), *Les cartes de la connaissance*, *Karthala-Urbama*, pp. 588-605.

Poulain, M. (1981), *Contribution à l'analyse spatiale d'une matrice de migrations internes*, Thèse de doctorat, Université de Louvain La Neuve, Belgique, Cavey, 226 p.

Nyusten, J. D., Dacey, M. F. (1961), A graph theory interpretation of nodal regions, *Papers and proceeding of the Regional Science Association*, vol. 7, n°1, pp. 29-42.

Tobler, W. R. (1987), Experiments in migration mapping by computer, *American Cartographer*, n°14, pp. 155-163.

Tobler, W. R. (1994, 1995), Migration Ravenstein, Thorntwaite, and Beyond. *Paper presented at the 1994 San Francisco' meeting of the Association of American Geographers (AAG'1994).* Published (1995) In: *Urban Geography, Special Issue: Spatial Analysis in Geography*, vol. 16, n°4, pp. 327-343.

Robinson A., H. (1982), *Early thematic mapping in the history of cartography*, Chicago University Press, 266 p.

Tufte, E., R. (1990), *Envisioning information*, Graphics Press, 127 p.

Kraak, M.J. (2003) Geovisualization illustrated. In: *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, n°57 pp. 390-399

Thornthwaite, C., W., 1934. *Internal Migration in the United States*, Dissertation, University of Pennsylvania, Philadelphia, cité par W. R. Tobler (1994, 1995).