



HAL
open science

Cartographier des flux et des mouvements

Françoise Bahoken

► **To cite this version:**

Françoise Bahoken. Cartographier des flux et des mouvements. Communication cartographique : sémiologie graphique, sémiotique et géovisualisation, ISTE Editions, pp 103-143, 2022, Sciences : Géographie et Démographie, 9781789480917. hal-03780453

HAL Id: hal-03780453

<https://hal.science/hal-03780453>

Submitted on 23 Jan 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.

4

Cartographe des flux et des mouvements

Françoise Bahoken¹

¹Univ Gustave Eiffel, IFSTTAR, AME-splott, F-77420 Marne-la-Vallée, France

4.1. Introduction

La cartographie de flux et de mouvements peut apparaître d'un point de vue sémiologique comme simple et peu variée dans la mesure où les modalités de représentation s'articulent essentiellement autour du tracé de figurés linéaires plus ou moins larges, éventuellement colorés et orientés. Toutefois, l'interprétation de ce type de carte qui peut représenter des flux ou des mouvements matériels (populations, marchandises, matières premières, véhicules, données etc.) ou immatériels (monnaies/billets, idées, langues, etc.) est à l'inverse très sensible aux choix effectués aux différentes étapes de la production par le ou la cartographe ; ces choix influencent, quant à eux, la perception de l'information, sa compréhension et conditionnent la communication du message transmis.

Si plusieurs éléments participent de la compréhension d'une carte thématique, l'attention de ce chapitre est focalisée sur une catégorie de cartes particulière : la carte de flux et de mouvements qui décrit des interactions spatiales. Le type de données, les analyses dont elles ont fait l'objet, leur transcription graphique, leur conception d'ensemble et leur signification relèvent d'enjeux de différentes natures (théoriques et méthodologiques, graphiques, thématiques, géographiques, rhétoriques, etc.) qui méritent d'être explicités, discutés et mis en perspective. Toutes ces composantes agissent en effet sur les figurés de la carte, le message perçu et *in fine* sur sa lecture et sa réception par un public donné. La forme perçue du signe

Communication cartographique : sémiologie graphique, sémiotique et géovisualisation
coordonné par Mericskay. © ISTE Editions 2021.

est en effet fondamentale dans la communication d'une carte de flux, son interprétation pouvant conduire à un contresens du message, conscient ou non (Bahoken, Lambert 2020).

Porter une attention à la cartographie de flux dans son ensemble (de la structuration des données aux figurés mobilisés, comme aux textes et couleurs choisies) est le propre d'une approche qui, si elle apparaît normative dans sa mise en œuvre, ambitionne de montrer aussi la distribution géographique des flux et mouvements, en particulier « leur structure sous-jacente » (Cauvin 1997) et non seulement leur motif perçu. Autrement dit, si comme dans toute carte, le design final importe dans la communication de l'information, celle des flux est souvent plus complexe : elle nécessite plus d'attention et de prise de recul en raison de la nature intrinsèque des données.

La cartographie directe de flux observés, sans réflexion préalable, est en effet généralement inopérante, en raison de la manifestation de différents effets qu'il convient de réduire, voire de supprimer, pour produire une image lisible et intéressante sur le plan thématique. Nous pouvons citer en premier lieu « l'effet spaghetti » (Bahoken, 2014a, 2014b) qui impose de filtrer l'information ou les figurés à représenter, de réduire leur résolution (en agrégeant les données), ou « l'effet d'amalgame » qui justifie de décomposer ou bien de transformer les données (Bahoken, 2016a). « L'effet spaghetti »¹ est le plus important d'entre eux. Il traduit une complexité² graphique de perception des flux cartographiés. Ne pas en tenir compte limite fortement l'efficacité de la carte dans la transmission d'un message, en réduisant la compréhension de l'information représentée. S'ajoutent à cela d'autres effets tels que « l'effet d'alignement », « l'effet d'itinéraire » et « l'effet de jointure », dans le cas de cartographies réalisées au niveau mondial (nous y reviendrons).

La double fonction d'information et de communication de la carte de flux apparaît ainsi plus difficile à remplir que pour d'autres cartes, une attention devant être portée aux différents piliers de la fabrique cartographique (Mac Eachren 1995) à savoir, ce qui relève, d'une part, du traitement des informations numériques et géographiques et d'autre part, de leur articulation pour construire une carte, incluant

¹ Cet effet se manifeste dès lors que le nombre de lieux dépasse la dizaine (pour 10 lieux, 10*9 soit 90 liens qui doivent être potentiellement représentés sur la carte).

² L'efficacité d'une carte dans la transmission d'un message est évaluée à l'aide de trois mesures qui sont (1) la complexité visuelle, correspondant à l'effet ressenti lors de la perception ; (2) la complexité colorimétrique lié au style et aux teintes (uniques, dégradées, combinées) et (3) la complexité graphique lié à la quantité de figurés représentés.

leur enrichissement sémiologique. Pour un thème donné, ce qui va donc changer d'une carte de flux à une autre tient davantage au cadrage théorique et conceptuel sous-jacent, à la manière dont l'espace géographique est considéré, aux méthodes mises en œuvre et aux outils mobilisés. L'objectif de ce chapitre est à la fois de proposer une synthèse des éléments participant de la construction de cartes de flux et de mouvements et de revenir sur les enjeux de communication associés à l'aune des évolutions techniques.

Aussi, le cadrage théorique et méthodologique de la cartographie de flux est présenté dans un premier temps. Sa mise en œuvre qui conduit aux principaux types de cartes de flux est proposée dans le second temps, au prisme d'un outillage spécifique. Les enjeux géographiques de la représentation de flux et mouvements sont explicités et illustrés dans un troisième temps à travers un exercice de multireprésentation cartographique de la mondialisation de flux de marchandises conteneurisés.

4.2. Considérations théoriques et méthodologiques de la construction cartographique des flux

Dans l'élaboration d'une carte de flux, les aspects théoriques et méthodologiques sont essentiels et le cartographe qui s'y attèle se doit de les connaître et de les questionner *a minima*. Le type de carte qu'il est possible de produire dépend avant tout des propriétés des données matérialisées au sein de matrices Origine-Destination (OD). De la même façon, l'interprétation de la carte, en termes de réseau de relations, d'échanges, de flux ou encore de mouvements est fonction des caractéristiques de la matrice. Elle passe par la communication d'une information cartographiée sous la forme d'une ligne de flux.

4.2.1. La ligne de flux

La représentation d'un flux exprime graphiquement le transfert d'une quantité mesurée (de personnes, de biens, de valeurs, etc.) entre un couple de lieux d'origine (i) et de destination (j). L'objet d'étude est un bipoint (i, j) qui mobilise deux géométries : les points (XY) associés aux coordonnées des OD formant le couple de lieux, $i(x_i, y_i)$ pour l'origine et $j(x_j, y_j)$ pour la destination, et la ligne exprimant *a minima* l'existence d'une relation entre (i) et (j).

La ligne, forme perçue du déplacement, va soit structurer conceptuellement la carte, en tant que « variable de l'image » (Bertin 1967), soit s'appuyer sur un bipoint

et être de fait sensible à une variation de sa morphologie. Quelle que soit sa géométrie, la sémantique de la ligne va par ailleurs pouvoir être enrichie par l'application de signes liés à la sémiologie graphique comme la forme, la taille ou la couleur (figure 4.1).

VARIABLE DE L'IMAGE	GÉOMÉTRIE	SÉMIOLOGIE				
		Qualitative			Quantitative	
		Couleur	Forme	Morphologie	Taille	Valeur
● bipoint ○	● ligne droite ○	● — ○ ● — ○ ● — ○	● — courbe ○ ● — tirets ○ ● — points ○	● — sinusoïde ○ ● — sinusoïde ○ ● — courbe ○	● bande droite ○ ● bande droite ○	● 20% noir ○ ● 60% noir ○ ● 100% noir ○
Ligne	(poly) ligne	● — ○ ● — ○ ● — ○	● — ○ ● — ○	● — ○ ● — ○	● bande droite ○ ● bande droite ○	● bande droite ○ ● bande droite ○
● origine ○ destination	— ligne de flux	Françoise Bahoken, 2021.				

Figure 4.1. Géométrie et sémiologie graphique de la ligne de flux

Au-delà de la mise en forme de la ligne (droite, courbe, droite à tirets, etc.), sa morphologie est importante, car elle permet de distinguer la représentation de flux qui s'appuie sur un bipoint de celle qui s'appuie sur une ligne matérielle. Ces deux types d'implantation spatiale correspondent en effet à deux concepts : le flux OD, que l'on représente sous la forme d'une ligne droite ou courbe, pour relier deux points (et dont la morphologie peut varier, pour des raisons esthétiques par exemple), et le flux affecté sur réseau dont le tracé (et donc la morphologie) sur la carte ne varient pas. Le tracé d'un flux affecté sur réseau est déjà donné puisque la ligne correspond au réseau de transport sous-jacent. La ligne utilisée comme variable de l'image matérialise ainsi le trajet effectué sur un axe de transport par le flux (définissant ainsi ce flux comme matériel³). Dans les deux cas, ces lignes perçues sont associées à des points qui structurent également l'image.

4.2.2. La logique de raisonnement cartographique Liens-Nœuds

La dualité de la représentation de flux mobilisant une ligne et au moins deux points traduit sur la carte la dualité d'un raisonnement théorique proposé à la suite de Tobler par Grasland (2009), articulant la représentation des interactions spatiales (lignes) et celle des positions (points). Cette posture correspond à une logique de

³ Ce flux matériel est parfois qualifié de flot ou encore de trafic.

raisonnement de type Liens-Nœuds qui fait appel à toutes les dimensions des données disponibles, autrement dit à la matrice complète.

Le raisonnement cartographique Liens-Nœuds trouve son origine dans la structure du tableau de départ, à savoir le tableau croisé (une matrice OD) où figurent par convention en lignes, les entités d'origine, et en colonnes, celles de destination. La cellule définie au croisement d'une ligne et d'une colonne décrit l'existence ou non d'une relation, voire une quantité transférée.

La partie centrale de la matrice correspond aux interactions que l'on représente par une ligne. Elles mettent en relation des lieux, représentés par des points (ou des zones), correspondant aux marges de la matrice qui décrivent, en premier, le total émis (ou reçu) par un lieu situé en ligne (ou en colonne). Des indicateurs peuvent ensuite être calculés sur les lieux et sur les liens, tel le volume de flux concerné par chacun des lieux et celui échangé entre eux (nous y reviendrons).

La figure 4.2 illustre la représentation cartographique d'une matrice de flux formée d'effectifs de population ou stocks (caractères quantitatifs discrets). Ce stock d'individus peut être traduit sous la forme de flèches plus ou moins larges, pour illustrer le déplacement et/ou de cercles proportionnels pour exprimer l'effet du déplacement sur les distributions des lieux de départ et/ou d'arrivée.

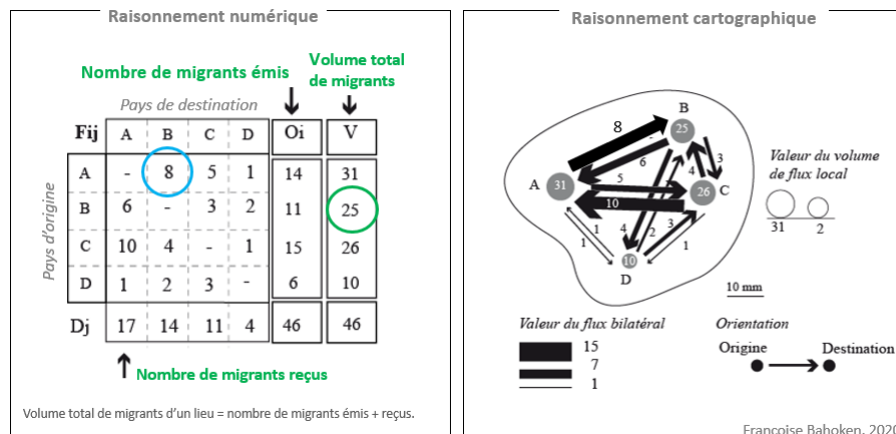


Figure 4.2. Raisonement et cartographie Liens-Nœuds (flux, lieux)

L'attention est attirée sur le fait que les points traduisent l'information disponible sur les marges de la matrice, en l'occurrence un volume de flux, et non l'information

portée sur l'éventuelle diagonale de la matrice. Mobiliser la diagonale est un cas particulier qui conduit à cartographier des informations interzonales et intrazonales⁴.

De la même façon que le choix d'une ligne/flèche/point dépend de la partie de la matrice mobilisée (cœur/marges), le choix d'une flèche/ligne pour matérialiser le déplacement dépend du format des données situées au cœur de la matrice, autrement dit du type de matrice OD.

4.2.3. Du type de matrice au type de flux cartographiés

Trois principaux types de matrices peuvent être distingués en fonction de la propriété générale de symétrie des valeurs situées de part et d'autre de leur diagonale principale. Leur caractère asymétrique, symétrique ou antisymétrique renvoie à trois grandes formes de cartes de flux mobilisant elles-mêmes trois combinaisons des figurés lignes/flèches (figure 4.3). Ces trois types de matrices s'inscrivent par ailleurs dans deux registres théoriques : la théorie des graphes (pour une analyse de la morphologie des données) et la logique gravitaire (pour une analyse des interactions spatiales ou territoriales).

⁴ Les informations portées sur la diagonale sont intrazonales, elles ne correspondent pas formellement à un flux défini comme le transfert d'individus entre OD. La diagonale correspond aux individus qui sont restés « immobiles » au niveau d'observation ou à ceux dont les déplacements n'ont pas franchi la limite de zone.

TYPE DE MATRICE				
Description				
	Type	asymétrique	symétrique	
Notation	(Fij)	(Lij)	(Fij ⁺)	(Fij ⁻)
TYPE DE REPRESENTATION				
Description	Echanges	Liaisons	Volumes bilatéraux	Transferts nets 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

Figure 4.3. Type de matrice et type de carte de flux.

Les matrices symétriques présentent des valeurs identiques de part et d'autre de la diagonale principale. C'est pourquoi elles doivent être cartographiées sous la forme d'une ligne non orientée ; cette ligne peut être pondérée et prendre la forme d'une bande.

Les matrices non symétriques voient leurs valeurs différer de part et d'autre de la diagonale principale, leur représentation impose le recours à au moins une flèche (bande orientée). Parmi celles-là, les matrices antisymétriques présentent des valeurs numériques identiques de part et d'autre de la diagonale principale mais de signes opposés, leur traduction graphique nécessite une unique flèche. Les matrices asymétriques dont les valeurs situées de part et d'autre de la diagonale diffèrent, mobilisent obligatoirement deux flèches de largeurs différentes et de sens opposés.

Aux trois grands types de matrices correspondent donc trois principaux types de représentation du flux (figure 4.4). Les matrices asymétriques décrivent des échanges bilatéraux. Les matrices symétriques permettent de cartographier un volume⁵ de flux bilatéraux, décrivant ainsi le « fondement du système d'échanges » (Tobler 1982). Les matrices antisymétriques représentent un solde bilatéral (ou bilan net) pour décrire des transferts nets bilatéraux illustrant la « dynamique du système d'échanges » (Tobler 1982). Il est possible d'aller plus loin en représentant, par exemple, une combinaison des cartes de volume/solde pour traduire l'asymétrie⁶ des flux (Bahoken 2016a).

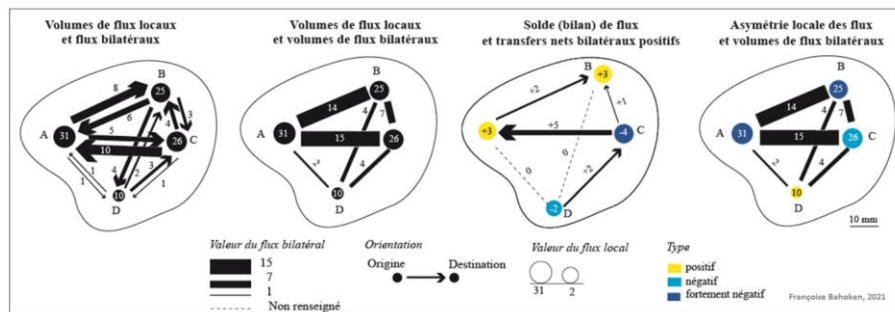


Figure 4.4. Principaux types de cartes de flux.

Le bilan net⁷ caractéristique d'une matrice antisymétrique fait normalement l'objet de deux cartes en miroir : l'une pour les valeurs positives et l'autre pour les

⁵ Le volume de flux (noté V sur la figure 4.2) est la somme arithmétique marginale (calculée sur les lieux) des valeurs de flux entrantes (Dj) et sortantes (Oi) : $V=(O_i) + (D_j)$; le volume bilatéral de flux est la somme arithmétique des valeurs des liens situés de part et d'autre de la diagonale principale d'une matrice non symétrique : $(F_{ij}) + (F_{ji})$.

⁶ L'asymétrie des flux est le rapport du solde sur le volume de flux, calculé sur les lieux et sur les liens. La représentation des liens qui en résulte nécessite d'être interprétée soit comme une variation de la carte des soldes, soit comme celle des volumes (puisque le résultat du rapport solde/volume ne peut être utilisé pour dimensionner la taille d'un signe).

La cartographie de l'asymétrie des flux étant appréhendée sur la figure 4.4 comme une variante de la carte des volumes, elle combine, au niveau des lieux, la carte du volume par un cercle proportionnel présentant une coloration discrétisée par l'asymétrie des flux (le rapport du solde sur le volume calculé sur les marges) et, au niveau des liens, la carte du volume bilatéral par une bande.

⁷ Le bilan net ou solde de flux est la différence arithmétique marginale (calculée sur les lieux) des valeurs de flux entrantes (Dj) et sortantes (Oi) ; le solde bilatéral de flux (ou transfert net)

valeurs négatives, avec des figurés de largeurs identiques mais de sens différents. Une attention particulière doit ainsi être portée au choix de la polarité cartographiée (i,j) *versus* (j,i), en particulier lorsque les lieux en lignes et en colonnes divergent comme dans celle décrivant des flux domicile-travail ou des importations-exportations par exemple.

Pour éviter ce mode de représentation qui conduit à choisir l'une des deux cartes, il est possible de produire une carte unique, en fusionnant ces deux cartes du bilan net pour en générer une seule (Bahoken 2016a). L'opération consiste à fusionner les deux flèches (i,j) et (j,i) en supprimant les deux têtes de flèches et en appliquant une teinte en opposition colorée⁸ pour évoquer le sens de circulation (figure 4.5).

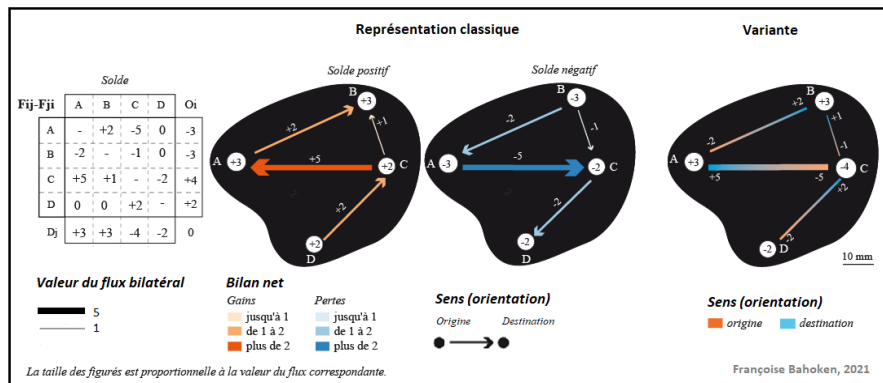


Figure 4.5. Variantes à la représentation des soldes bilatéraux.

Ce type de représentation présente plusieurs avantages comme celui de synthétiser l'information en une seule carte tout en évitant de recourir à la traditionnelle flèche et ses contraintes graphiques. La représentation de la dynamique du flux en opposition colorée apporte aussi une aide à l'interprétation de la carte qui peut être lue du point de vue des origines et/ou des destinations. De plus, ce type de carte permet également de représenter de manière originale des pôles d'émission et d'attraction des flux.

est la différence arithmétique des valeurs des liens situés de part et d'autre de la diagonale principale d'une matrice non symétrique : (Fij)-(Fji) – voir figure 4.2.

⁸ L'utilisation du principe de l'opposition colorée pour représenter des flux n'est par conséquent applicable que pour les matrices antisymétriques, sinon il conduit à masquer une partie de l'information.

Si le type de signe (ligne/flèche) simple ou double dépend du type de matrices, sa morphologie traduit aussi un type de cartes de flux/mouvement.

4.2.3. Du flux au mouvement

Le dessin de la ligne/flèche de flux s'appuie sur des implantations spatiales ponctuelles (bipoints) ou linéaires dont la signification dépend de connaissances sur le mode de transport entre les lieux. Le cas idéal pour une représentation complète/correcte des flux consiste à connaître le cheminement exact emprunté par le flux, mais c'est assez rare. L'information généralement accessible est celle des OD qui ne saurait définir qu'une forme linéaire approximative, décrivant de manière imparfaite un mouvement ; par suite, l'information sur le mode de transport comme les itinéraires empruntés est lacunaire voire inexistante.

Le fait que la géométrie de la ligne/flèche soit sinueuse ou non pour représenter un mouvement des transports n'est pas sans conséquences sur l'interprétation de la carte, puisque la norme du vecteur sous-jacent traduit la « [distance cartographique](#) » perçue par le lecteur (Bahoken 2016).

Trois formes de distances sont effectivement mobilisables dans la représentation cartographique de flux :

- la [distance cartographique](#) que l'on perçoit sur la carte par la longueur du lien, et que l'on interprète en termes de flux ou de mouvement, selon la morphologie de la ligne ;
- la [distance géographique](#) qui est géométrique, généralement approximée par la distance euclidienne (le vol d'oiseau conférant au lien son aspect rectilinéaire) ;
- la [distance empirique \(ou mesurée\)](#) liée au coût généralisé de transport, dont la transcription cartographique suit l'infrastructure de transport utilisée ou le cheminement dans l'espace.

Un des éléments clé dans le processus de représentation cartographique de flux est par conséquent la connaissance ou non de l'infrastructure de transport qui confère à la ligne sa forme sinueuse, approximant ce réseau avec plus ou moins d'exactitude. Cela étant, quatre grandes approches peuvent être mises en œuvre pour cartographier un mouvement, selon qu'elles agissent sur les informations mathématiques ou géographiques, qu'elles soient purement graphiques et sémiologiques, ou encore infographiques liées à la communication cartographique proprement dite.

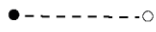
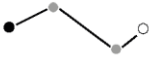







– L’approche (géo)cartographique consiste à agir sur l’information géographique (le maillage), pour choisir l’espace de définition des flux à représenter, sa résolution, son échelle, voire son mode d’implantation spatiale.

– L’approche mathématique est fondée sur une transformation de l’information à représenter, par exemple en la pondérant, en la modélisant ou bien en la filtrant à l’aide de variables spatiales.

– L’approche (carto)graphique agit sur le dessin des flux sur un plan pouvant être muni d’une projection cartographique, et sur son enrichissement sémantique à l’aide de variables visuelles. Elle relève essentiellement de principes graphiques, éventuellement adaptées à la carte comme modalité d’expression présentant une forte contrainte de position des signes, dans un espace souvent géographique.

– L’approche infographique est liée au support écran ; elle consiste à agir sur la temporalité de la représentation pour montrer la dynamique d’un flux ou d’un mouvement de manière animée ou dynamique, en utilisant des variables visuelles adaptées comme le clignotement, les particules animées ou encore les gouttelettes (*droplets*) (Côme *et al.* 2021).

La figure 4.6 illustre l’importance du type de concept flux/mouvements, de leurs géométries qui conduisent à qualifier les deux types de cartes (flux/flux affectés sur réseau), comme traduction d’un mouvement des transports réel ou approximé.

Concept	Flux	Flux affecté sur réseau (ou mouvement des transports)	
implantation	ponctuelle (ou areale)	linéaire	
		<i>réelle (infrastructure)</i>	<i>approximée</i>
Ligne			
Ligne pondérée			
flèche pondérée			
Type de lieu ● origine ○ destination ● transit		Type de déplacement — matériel - - - - immatériel	

Françoise Bahoken, 2021.

Figure 4.6. Géométrie des flux et des mouvements des transports.

Le cas d'une implantation linéaire signifie que le support de la carte (l'infrastructure de transport) est l'information de flux en elle-même, qui conduit à la représentation de flux affectés sur réseau. De telles cartes sont caractéristiques d'une information de flux plus riche, puisque le mode de transport, les quantités en déplacement et l'enchaînement de lieux de transit sont connus et permettent de représenter spatialement la trajectoire, pour une cohérence de la carte avec la réalité géographique de l'espace étudié.

Dans le cas d'une implantation biponctuelle, le trajet à vol d'oiseau illustre le transfert d'un lieu à un autre indépendamment de contraintes spatiales, comme si l'espace géographique n'avait pas de prise sur le déplacement. La forme approximée de la ligne tracée entre les OD génère une carte nécessairement partielle, traduisant la lacune d'informations sur le cheminement exact emprunté par le flux. La différence entre les cartes de « flux » et celles de « mouvement » réside ainsi dans la prise en compte de contraintes spatiales au déplacement dans la construction cartographique du flux (Bahoken 2016 ; Bahoken *et al.* 2016) et non uniquement dans leur modélisation mathématique effectuée en amont de l'étape de représentation, ou bien dans le design graphique intervenant en aval.

Communication cartographique : sémiologie graphique, sémiotique et géovisualisation
coordonné par Mericskay. © ISTE Editions 2021.

Tous ces aspects liés au dessin ne sont pas anodins et les possibilités de leur mise en forme ne sont pas extensibles. Elles dépendent également de l'outil dont le choix ne sera pas sans conséquence sur le type de carte à représenter et sur son style.

4.3. L'image cartographique du flux : entre continuité et ruptures technologiques

La représentation cartographique de flux, ses méthodes sous-jacentes et ses principes usuels participent d'une histoire longue de la cartographie thématique. Elle s'ouvre avec la représentation « des mouvements des transports », une expression empruntée à Minard, un ingénieur qui a eu l'idée de représenter visuellement des statistiques sur les mouvements et, de ce fait, a produit des cartes de flux/mouvements, fixant alors les fondements d'une méthode toujours d'actualité. Des premières cartes de Minard aux géovisualisations interactives du géoweb, le visage des cartes de flux a évolué au gré des avancées théoriques et méthodologiques en lien avec le développement d'outils dédiés (Bahoken 2019). Ces changements qui concernent le traitement des informations (mathématiques et géographiques) contrastent nettement avec leur mise en carte, fondée sur une méthode de représentation simple. La représentation de flux, réalisée selon une [logique de flux](#), consiste en effet à agir sur la largeur de la ligne entre OD, pour traduire l'importance du flux transféré, éventuellement sur les tailles des lieux d'OD pour illustrer l'effet de ces flux sur leur distribution spatiale.

4.3.1. Permanence d'une méthode de représentation ancienne

Précurseur dans le domaine, Minard consacra sa retraite d'ingénieur en chef des Ponts et chaussées à la figuration des mouvements des transports, dans le cadre d'un système de *Cartes figuratives*⁹ signant d'ailleurs l'âge d'or de la cartographie de flux. Il s'intéressa en premier lieu à la représentation des « flux matériels » (s'appuyant sur une infrastructure) avant de généraliser le procédé aux « flux immatériels », non affectés sur un réseau de transport.

⁹ La carte figurative est celle qui ne respecte pas exactement la géographie des espaces représentés pour privilégier par leur représentation, la perception de l'information de flux au détriment de leur géographie. Voir la note suivante portée sur la *Carte figurative du mouvement des langues anciennes* : « La carte n'est que figurative et les proportions géographiques ont été altérées pour une représentation plus intelligible ».

Minard dont une anthologie est disponible dans Grootens et Rendgen (2020), mobilise un procédé de cartographie distributive des flux popularisé sous la dénomination de diagramme Sankey¹⁰. Minard mobilise ainsi la variable visuelle dimension (qui deviendra la taille), pour cartographier les mouvements du transport à l'heure où celle-ci était surtout utilisée pour les populations. Il l'appliquera à différentes implantations ponctuelles pour caractériser des flux selon une **logique de lieux** (des villes de réception, des ports d'émission de tonnage, etc.) avant de la mettre en œuvre sur des lignes. Il représente par exemple une circulation routière, en caractérisant la sollicitation des tronçons de l'infrastructure par une variation de leur largeur¹¹. Minard fait également appel à la couleur selon différentes modalités. Sa première carte réalisée en noir et blanc présente plusieurs intensités qui évoquent l'utilisation de la variable visuelle valeur, pour distinguer différents parcours plus ou moins complets (Palsky 1996). Lorsqu'il utilise la couleur dans son acception qualitative, pour illustrer le mouvement de vins et spiritueux par exemple, les teintes identifient les diverses voies de transport (hydrographiques, maritimes, terrestres) ou bien le sens du mouvement (exportation *versus* importation).

Si les travaux cartographiques de Minard sont purement descriptifs, c'est parce qu'ils sont précurseurs. Il faudra en effet attendre la fin du XIX^e siècle et la publication des Lois empiriques de la migration par Ravenstein (1885, 1889) accompagnées de cartes, pour que s'ouvre une nouvelle ère de la cartographie des flux/mouvements (Bahoken 2019), en lien avec une pratique de la statistique graphique qui n'aura de cesse de se développer. Le développement de la statistique en lien avec l'avènement de la démographie va en effet conduire à la mise en place progressive d'un corpus théorique et méthodologique spécifique à l'analyse des interactions spatiales - voir notamment la thèse de (Poulain 1981) qui en présente un historique. Ce corpus, souvent accompagné de cartes, s'enrichira au cours du temps de transferts conceptuels provenant des sciences dures, en particulier de la physique (ce qui conduira notamment à l'analogie gravitaire). Des méthodes de représentations plus innovantes, permettant de représenter les résultats de ces différentes avancées théoriques, vont alors progressivement se développer, depuis la carte Courants migratoires de Ravenstein (1885) et celles proposées par

¹⁰ Le diagramme Sankey doit son nom à cet ingénieur mécanicien britannique qui tira son succès dans l'utilisation de ce procédé distributif des flux, pour représenter la circulation énergétique d'un moteur. Le procédé prend la forme d'un système de bandes colorées de tailles et de morphologies variables, tracées entre des points d'OD situés sur des axes verticaux parallèles.

¹¹ La représentation cartographique de l'utilisation d'un réseau routier dite en « serpent de charge » avait été préalablement introduite par Harness en 1836 pour dénombrer le flot de véhicules depuis/vers Dublin.

Thornwaithe (1934) fondées sur des principes physiques. Cette posture est également celle de Tobler (1995) qui s'en saisira dès les années 1970, notamment pour démontrer les lois empiriques de Ravenstein et élaborer plusieurs représentations cartographiques de flux/mouvements innovantes.

4.3.2. D'une approche discrète à une approche continue des flux/mouvements

Tobler, géographe et cartographe, dont les approches combinent mathématique et informatique (Cauvin, 2020), a joué un rôle majeur dans le développement d'une approche numérique et cartographique des flux et mouvements. Il s'intéressa à leur modélisation et à leur représentation (Tobler 1970b), en termes de processus incluant les outils permettant de les mettre en œuvre (Tobler 1970b, 1979b).

Tobler (1979a) met d'abord au point une cartographie associée à un modèle permettant de représenter des attractivités (des flux selon une logique de lieux), avant de s'intéresser aux flux/mouvements entre des lieux. Le premier problème qu'il cherche à résoudre est d'ordre cartographique. Il porte sur la représentation de mouvements, compte tenu des positions géographiques des couples d'OD et des valeurs des flux qui les relient. Tobler explore ensuite la construction d'un modèle simple et opérationnel lui permettant de retrouver les mouvements et les attractivités des lieux. Il utilise abondamment la cartographie pour illustrer les résultats qu'il obtient dans le cadre du paramétrage de son modèle pour estimer des valeurs de flux à partir des distances entre OD et des sommes marginales de la matrice, ce qui correspond à une inversion du modèle gravitaire. Ses travaux le conduisent à utiliser le calcul matriciel qu'il transfère ainsi à l'analyse des interactions spatiales. Tobler (1979a, 1982) montre ainsi que la meilleure façon de cartographier des flux est de représenter des champs de vecteurs conduisant à représenter des attractivités (figure 4.7 à droite), calculées sur ce qu'il nomme « la composante négative des flux », autrement dit sur une matrice antisymétrique.

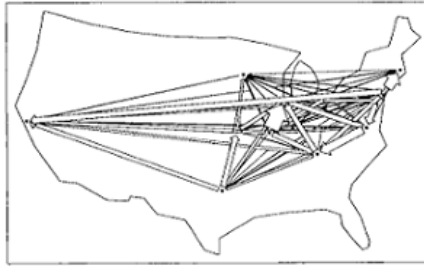
Sa réflexion d'ensemble (Tobler 1987) le mène à poser les fondements d'une représentation cartographique des matrices OD établissant trois types de cartes de flux : les cartes discrètes, les cartes continues et les cartes animées¹² qui se différencient « en fonction de la manière dont elles montrent le mouvement » (Tobler, 1970a). La figure 4.7 présente ces deux paradigmes discrets (à gauche), et continu (à droite) tels que conceptualisés par Tobler (1981).

¹² Les cartes animées ne sont plus aujourd'hui un modèle de carte de flux/mouvement en tant que tel : les mouvements pouvant aujourd'hui être présentés sur des cartes statiques ou interactives/animées.

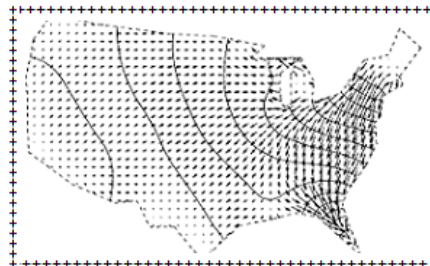
Dollar Bill Movements in the US

net flow

Discrete representation



Continuous patterns representation



Based on computer programs from the 1980s

La planche originale - issue d'une communication orale de Tobler sur les possibilités de la cartographie de flux/ mouvements à partir des modèles et outils qu'il propose - étant d'une qualité insuffisante en vue d'une publication, elle a fait l'objet d'une reconstitution quasi à l'identique.

Source : Tobler, W.R. (1981). A model of geographical movement, *The Geographical Analysis*, 13(1), 1-20.

Françoise Bahoken, 2021.

Figure 4.7. Illustration d'une cartographie discrète et continue de flux/mouvements (source : Tobler 1981)

4.3.3. Cartographier les flux à l'heure de l'informatisation

L'évolution de l'iconographie des flux est indéniablement liée aux outils permettant de produire la carte correspondante. Si comme l'indique Joliveau (2011), l'avènement du géoweb a modifié l'usage des cartes en ligne et leur fabrication, le support géonumérique caractéristique des cartes en ligne n'en demeure pas moins une nouvelle « ligne de fuite » (Plantin 2012). Cela signifie que la carte contemporaine s'inscrit dans cette longue histoire du support cartographique, depuis les premières tablettes d'argiles aux cartes historiques des déplacements mayas, en passant par la table de Peutinger pour prendre la forme contemporaine des cartes actuelles.

Bien que toujours inscrite dans son époque, si la carte de flux a pu évoluer au gré des avancées théoriques et méthodologiques (Bahoken 2019), c'est avant tout grâce au développement d'outils dédiés. Le flux, qui a toujours fait figure de parent pauvre de la cartographie thématique, a toujours nécessité un outillage spécifique développé par les chercheurs eux-mêmes. Cette restriction historique du développement des

outils de flux au monde académique n'a cependant pas empêché leur évolution, ni leur adaptation régulière aux langages du moment. Les outils permettant le dessin de flux sont devenus aujourd'hui incontournables, grâce aux possibilités actuelles de déploiement dans différents environnements, en lien avec la disponibilité de corpus de données massives, souvent libres et ouverts qui suscitent des besoins accrus de visualisation.

L'informatisation des années 1970, suivie du développement des SIG jusqu'à l'interactivité des cartes du web depuis 2010, a en effet profondément renouvelé et, dans le même temps, facilité la mise en cartes des matrices OD, en particulier celles qui sont denses. Contrairement aux cartes classiques, notamment choroplèthes, l'outillage des cartes de flux a pratiquement toujours été le fait des cartographes eux-mêmes, en réponse aux besoins spécifiques de représentation de ce type de données. S'il n'existe pas d'outils génériques (nous y reviendrons), l'informatisation va cependant modifier le rendu de la carte, la manière de l'élaborer comme certaines innovations techniques antérieures.

Plusieurs problèmes techniques et verrous ont été levés avec l'informatisation et les nouvelles possibilités algorithmiques. La géovisualisation des matrices OD profite aussi de l'engouement général pour la visualisation des données relationnelles et d'anciennes méthodes de représentation des flux sont ainsi remises au goût du jour et progressivement rendues accessibles. C'est en particulier le cas de la graphie des routes, y compris pour des grandes matrices, qui est désormais possible à l'aide de techniques dites de *l'edge bundling*. Cette méthode purement graphique a été développée dans l'objectif de réduire la complexité graphique de la carte de flux, en fusionnant le tracé des lignes pour approximer la représentation de routes principales. Plusieurs propositions ont pu être réalisées dans ce sens, parmi lesquelles celles de Phan *et al.* (2005), Holten (2006) et Lambert *et al.* (2010). On observe également, d'une part, un effort spécifique dans l'automatisation du dessin de graphes spatialisés, dans une perspective qui intéresse directement la représentation de flux (Jenny *et al.* 2018). D'autre part, un renouvellement de la stylisation des graphes qui permet d'enrichir la palette des possibilités de représentation graphique des lignes de flux/mouvements.

Cependant, ces avancées ne se sont pas faites sans difficultés. La représentation cartographique de flux a toujours été un peu laissée de côté dans le champ de la cartographie thématique. Elle n'a par exemple jamais réellement été implémentée dans les outils de CAO et de SIG jusqu'à une époque récente. Une première explication tient au fait que ce type de cartes nécessite un important traitement amont du tableau complexe, la matrice OD. Une seconde explication résulte du constat que la construction de ce type de cartes n'est souvent pas enseignée dans le

système universitaire français, tout au plus font-elles l'objet d'une, voire de deux, séances de travaux dirigés dans quelques formations spécialisées. La cartographie de flux ne fait pas non plus l'objet de manuels dédiés, ce qui ne facilite pas son appropriation. C'est pourquoi la construction de cartes de flux a toujours fait l'objet d'une instrumentation dédiée issue du développement de programmes et d'outils spécifiques émanant de personnes spécialistes de la question ou intéressées par cette forme de représentation.

Depuis la proposition initiale du programme de cartographie automatique de données de flux origine-destination *Flowmapper* (Tobler 1979b), développée en Fortran¹³, et actuellement en cours de portage dans l'écosystème R (Lambert *et al.* 2021), l'outil a connu plusieurs versions. D'abord intégré au sein d'outils autonomes, il a ensuite été implémenté dans différents environnements de représentation cartographique (Philcarto, Cartes & données, Magrit) et de SIG (ArcGIS, MAPINFO, QGIS) ce programme a connu plusieurs générations de boîtes à outils développées avec plusieurs langages de programmation (Map Basic, Visual Basic, Python, etc.). Les années 2010 ont vu l'apparition d'applications cartographiques dédiées à la cartographie de flux développées en java (Boyandin 2010 ; Boyandin *et al.* 2011), puis en JavaScript comme Arabesque (Côme *et al.* 2019). Cartographier des flux aujourd'hui, c'est composer avec plusieurs familles d'outils et de *plugins* aux fonctionnalités et aux performances variées, mais qui répondent aux besoins spécifiques de communautés distinctes : cartographes de métiers, datajournalistes, développeurs en informatique graphique ou encore scientifiques utilisant des langages comme R ou Python.

4.3.4. L'image cartographique du flux sur le géoweb

Les cartes de flux contemporaines, à l'instar de la production cartographique sur le web disposent d'un impact visuel fort soutenu par une stylisation moderne. Elles sont largement survalorisées dans leur apparence en raison du caractère « innovant » et « moderne » du support. Les cartes de flux du géoweb¹⁴ bénéficient par ailleurs d'une nouvelle forme d'autorité spécifique aux technologies de l'information et de la communication. Et cette autorité est liée aux effets qu'elles produisent lors de leur réception par différents publics, à leur « potentiel performatif, c'est-à-dire à sa capacité à mettre en jeu l'interaction avec celui qui regarde l'image ou l'œuvre » (Amilhat Szary 2018).

¹³ Langage de programmation généraliste apparu en 1957.

¹⁴ Pour plus d'éléments sur le géoweb et son impact sur la communication cartographique voir les chapitres 5 et 6.

L'apparence et le style de l'image sont fondamentaux dans la réception du message cartographique et le géoweb y répond bien : le support numérique, de par l'étendue quasi infinie des possibilités de stylisation des cartes, permet de renouveler l'apparence des cartes de flux. La figure 4.8 présente quatre cartes de flux, reposant sur le même jeu de données, réalisées avec l'application en ligne Arabesque (Côme *et al.* 2019). Grâce à ce type d'outil, le cartographe peut en quelques clics, depuis son navigateur Web, personnaliser la mise en forme des données, le style des flux cartographiés comme les fonds de carte.

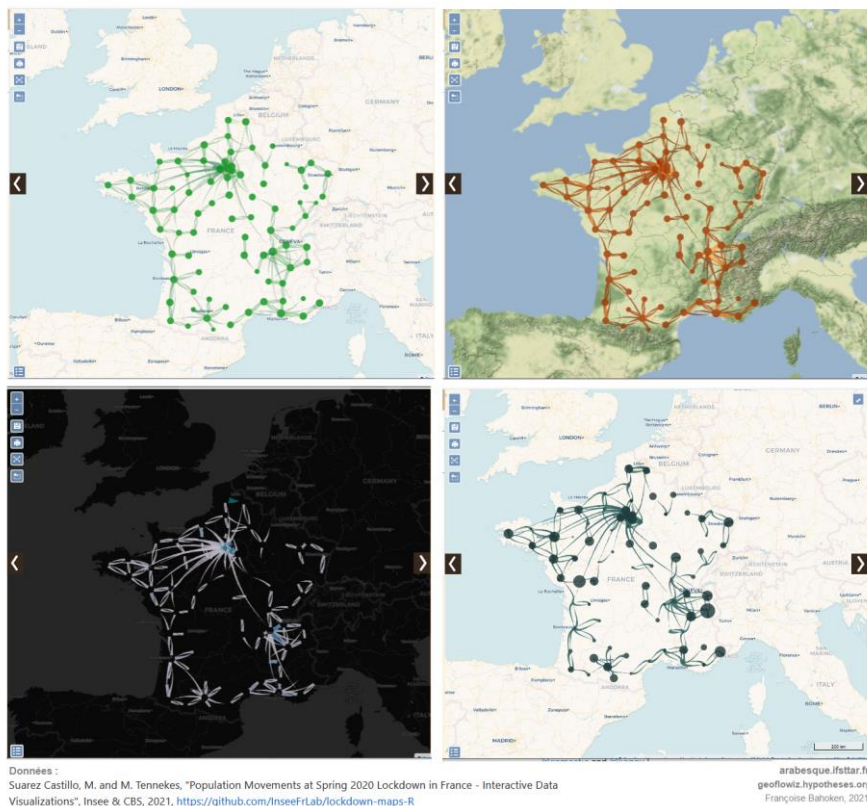


Figure 4.8. Exemple de stylisation d'une carte de flux avec l'application Arabesque.

La communication d'une information de flux par voie cartographique, y compris géonumérique, ne saurait toutefois laisser de côté la sémiologie graphique qui

permet de rendre les cartes significatives¹⁵. Il importe en effet de rappeler l'importance du langage cartographique dans la transmission de l'information grâce au rôle joué par l'application de variables rétinienne. Parmi les trois modes d'implantation spatiale (le point, la ligne et la surface), la carte de flux en requiert deux spécifiques : le bipoint et la ligne déjà évoqués.

La figure 4.9 s'inspire d'une proposition de présentation d'éléments de la représentation cartographique sur le géoweb (Mericskay 2016), pour préciser le cas des flux et mouvements, leurs implantations spatiales et leurs géométries. Elle introduit la possibilité d'une implantation bipoctuelle de sorte que les flux OD et ceux affectés sur réseau sont différenciés. Le bipoint est présenté comme une modalité de l'implantation spatiale ponctuelle, là où l'implantation linéaire est une modalité principale, portant à quatre le nombre d'objets (géo)graphiques élémentaires (le point, le bipoint, la ligne et la surface).

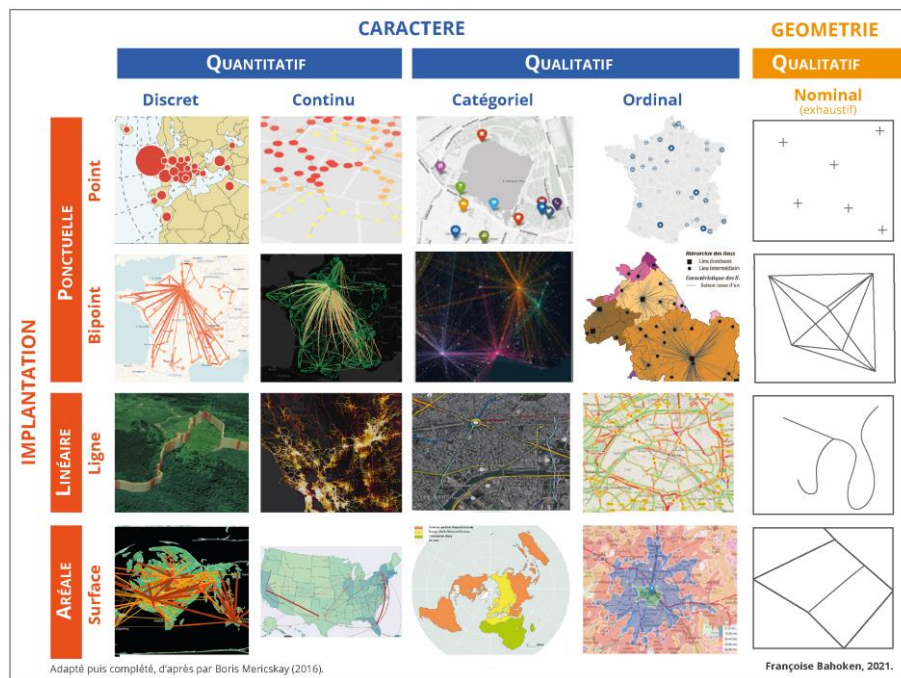


Figure 4.9. L'image des flux et réseaux communiquée dans le géoweb

¹⁵ Voir le chapitre 6 qui revient sur la sémiologie graphique du géoweb.

Ainsi plusieurs configurations de mise en forme apparaissent en fonction de la nature des données de flux représentées, chacune d'elles transmettant autrement l'information :

– la représentation d'un caractère quantitatif continu conduit à tracer un figuré linéaire puis à nuancer sa teinte en appliquant une discrétisation effectuée sur une variable continue ;

– la représentation d'un caractère qualitatif catégoriel consiste à colorer les figurés linéaires en fonction d'une classe d'appartenance qualitative ;

– la représentation d'un caractère qualitatif ordinal revient à représenter une distribution de valeurs de flux ordonnés en adaptant la sémiologie des sommets de manière à traduire la hiérarchie des lieux issues d'une analyse, de type de flux-dominants (Nyusten et Dacey 1961) par exemple.

Au-delà de ces aspects liés aux données, au rendu cartographique obtenu avec l'un ou l'autre des outils contemporains, la cartographie de flux relève d'enjeux spécifiques qui se manifestent avec d'autant plus d'acuité qu'elle s'exprime au niveau mondial. Les contraintes géographiques exercées à cette échelle placent en effet l'espace géographique au cœur des enjeux liés à la communication cartographique de l'information de flux/mouvements.

4.4. Enjeux liés à la cartographie de flux à travers l'exemple de flux maritimes mondiaux

Afin d'examiner et de discuter des enjeux de communication cartographique liés à la représentation de flux, nous proposons dans cette dernière partie un exercice de multireprésentation¹⁶ autour de l'exemple de flux commerciaux internationaux observés au niveau mondial. Pour synthétiser une série d'enjeux relevant de l'intention¹⁷ de la carte, nous utilisons une matrice asymétrique reliant six macro-régions économiques par des flux mondiaux internationaux conteneurisés observés en 2006.

Ces flux correspondent à un nombre de conteneurs transporté d'une région à une autre, exprimé en milliers d'Équivalent Vingt Pieds (EVP). Nous partons d'une

¹⁶ Cette question de la multireprésentation cartographique est développée dans le chapitre 1. Elle est également mise en œuvre dans le chapitre 3 autour d'un jeu de données de la population mondiale.

¹⁷ Les enjeux relevant de la réception de la carte ne sont pas présentés. Voir un exemple dans (Bahoken *et al.* 2020).

représentation de ces flux initialement publiée en français dans *l'Atlas de l'Europe dans le Monde* (Didelon *et al.* 2008), que nous considérons comme une image de référence de ce type de cartes (figure 4.10). L'objectif est ici de montrer les conséquences de différents choix théoriques et méthodologiques sur les cartes associées. La carte initiale va ainsi faire l'objet de déconstruction/reconstruction selon différentes perspectives (sémiotique, projection, fond de carte...) pour nous permettre au final de proposer et de discuter d'une série de représentations (carto)graphiques reposant sur les mêmes données, mais véhiculant le message de différentes manières.

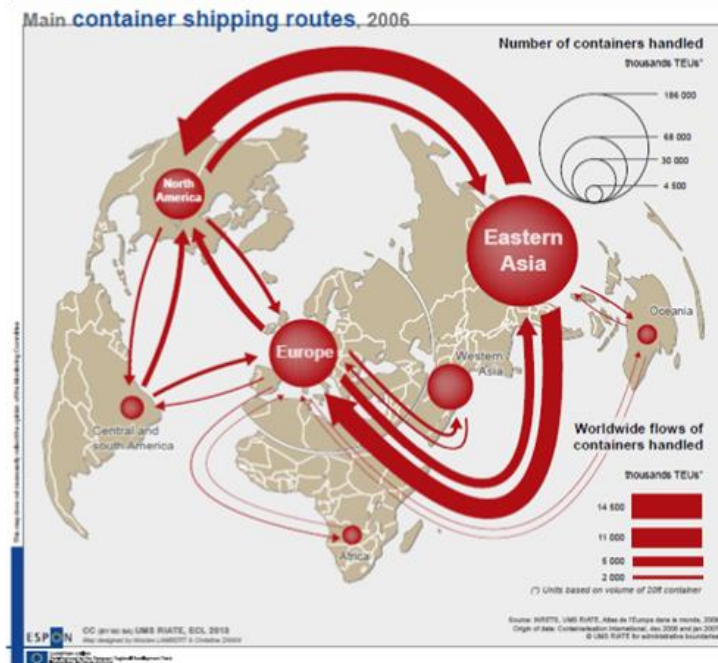


Figure 4.10. Principales routes maritimes du transport de conteneurs.
(Auteurs : Lambert et Zanin 2006)

4.4.1. Enjeux de la cartographie de flux au niveau Monde

La carte de la mondialisation est soumise aux spécificités du niveau monde, lorsque ce dernier est appréhendé comme un territoire (Didelon 2013). Cette posture implique de tenir compte des particularités de cette échelle qui résultent en

particulier de la sphéricité de la terre, de l'alternance Terres/Mers qui génèrent des effets ou des contraintes graphiques pour leur mise en carte sous la forme de flux.

Le caractère informatif de la carte, sa cohérence nécessitent que sa fabrication s'inscrive dans un double registre : celui de la **thématique** (la représentation de flux maritimes mondiaux présente des caractéristiques qui diffèrent de celles des flux migratoires) ; et celui de **l'intention** du ou de la cartographe de communiquer une information plutôt qu'une autre, en réponse à une demande sociale intéressant la réception de la carte. Cette demande sociale d'information cartographique fait référence à la **destination** du document, à sa **réception** par un public à un moment donné, dans un contexte géopolitique ou socio-économique particulier.

Hormis le choix du système de projection, les enjeux d'une représentation cartographique de flux au niveau Monde sont principalement liés, d'une part, à la sphéricité de la terre ; en effet, le passage de la sphère au plan induit le choix d'une projection adaptée au type de flux, en raison d'un « **effet de jointure** » des flux. Cet effet correspond au fait que certaines projections entraînent l'interruption de lignes de flux s'exprimant à très longue distance, suggérant alors abusivement une interruption du déplacement. Ces enjeux sont d'autre part associés à l'alternance Terres/Mers qui génère deux contraintes particulières : un « **effet d'alignement** » (ou effet de position) (horizontal, vertical ou oblique) des lieux d'intérêt qui nuit à la perception claire des flux en raison d'un chevauchement trop important des signes et un « **effet d'itinéraire** » qui implique de prendre en compte le mode de transport dans la cartographie des flux terrestres et maritimes, au risque d'une incohérence thématique (dans le cas de flux maritimes).

4.4.1.1 L'effet d'alignement et la courbure des lignes

« L'effet d'alignement » résulte d'une vision du monde selon le modèle classique centre-périphérie qui focalise généralement l'attention sur les quelques lieux dits centraux. Ces lieux structurent des macrorégions à l'intérieur desquelles d'autres lieux se trouvent placés sous leur influence. La polarisation de l'économie mondiale par ces lieux centraux, majoritairement situés dans l'hémisphère nord, réduit de fait la carte à un espace de définition limité à un demi-planisphère, potentiellement biaisé par l'alignement horizontal de ces centralités (figure 4.11).

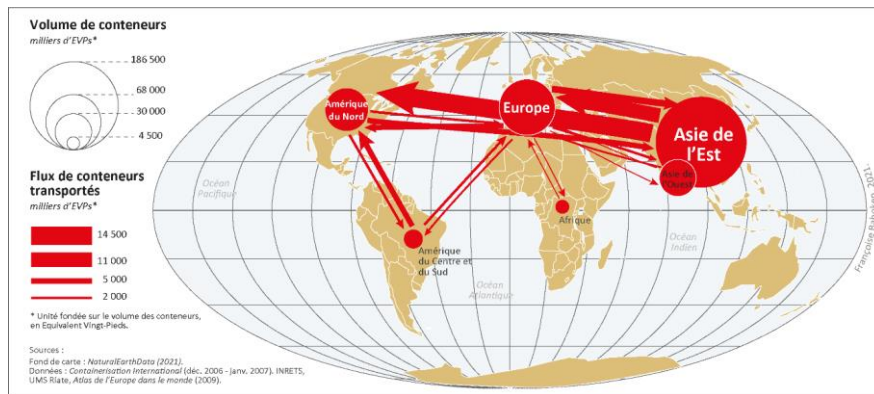


Figure 4.11. L'effet d'alignement de lignes de flux maritimes mondiaux.

La conséquence de cet effet de position est d'empêcher la visualisation des motifs spatiaux principaux, ceux de la Triade par exemple, en raison du chevauchement des flux bilatéraux visible dans les régions situées aux latitudes élevées et qui présentent des échanges importants.

L'une des solutions pour remédier à ce problème consiste à changer la forme des flèches rectilinéaires et à les transformer en courbes (figure 4.12). L'incurvation est efficace visuellement dans la mesure où la carte est désormais plus claire, grâce à la réduction de deux types de complexités : celle de la perception visuelle et celle de la compréhension de l'information. Plus lisible, la carte devient plus agréable à regarder modifiant par la même son efficacité.

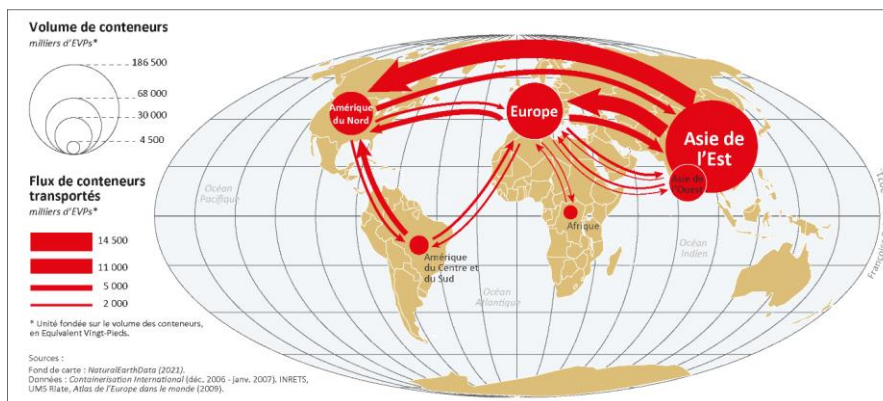


Figure 4.12. L'effet d'alignement de lignes courbes de flux maritimes mondiaux

Toutefois, les améliorations apportées par ce design des flèches ne sont pas sans conséquences sur la perception de l'information. En abuser conduit potentiellement à travestir l'information, en raison du rôle joué par la distance cartographique perçue par la longueur de la ligne (elle est plus importante pour les lignes courbes que droites) dans l'interprétation de la carte. De plus, la courbure des bandes/flèches augmente leur surface visuelle perçue, suggérant alors que l'information aurait été modifiée entre les figures 4.11 et 4.12.

Le fait que la ligne courbe soit plus longue que la ligne droite peut laisser croire que la distance parcourue par ces flux est plus grande. Les conteneurs transportés entre les régions asiatiques et l'Amérique du Nord par exemple semblent avoir pris un plus long chemin, ce qui n'est pas le cas. Le passage à la courbe se faisant, en pratique, par l'ajout de points intermédiaires, le résultat obtenu pourrait également suggérer la présence de temps d'arrêt du voyage, d'escales portuaires pour y effectuer des opérations de transport (chargement/déchargement) pourtant inexistantes dans le jeu de données. La courbe conduit finalement à la transmission d'une information erronée introduite par l'éventuelle modification de l'organisation générale du transport, l'augmentation la longueur du voyage effectué dans la réalité, ce qui a pour conséquences une augmentation du coût du déplacement, du temps de transport et ainsi de suite.

Cela ne signifie pas qu'il faille éviter d'élaborer des cartes de flux de ce style. L'attention est plutôt attirée sur l'importance de la forme de la ligne de flux dans la compréhension de la carte qu'une approche uniquement graphique vient travestir, en particulier au niveau Monde sensible aux positions relatives des lieux les uns par rapport aux autres.

On pourrait alors penser que ce problème d'alignement peut être en grande partie résolu par le choix d'un système de projection approprié au thème à représenter qui éviterait de courber les lignes. La figure 4.13 applique par exemple une projection de Bertin¹⁸ qui repositionne les différentes centralités et modifie les lignes en conséquence.

¹⁸ Cette projection conçue par Bertin en 1953 est présentée par l'auteur comme étant une « Projection à compensation régionale dans laquelle la compensation n'est plus homogène mais recherchée dans une plus grande déformation des océans, au bénéfice d'une moindre déformation des continents. » (Bertin 1967).

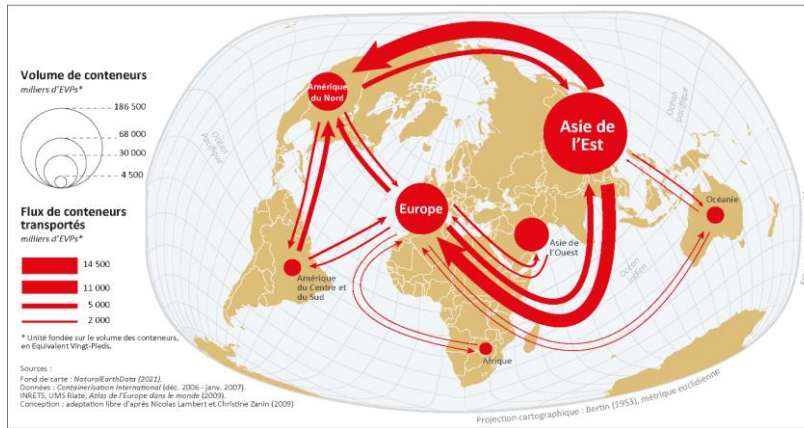
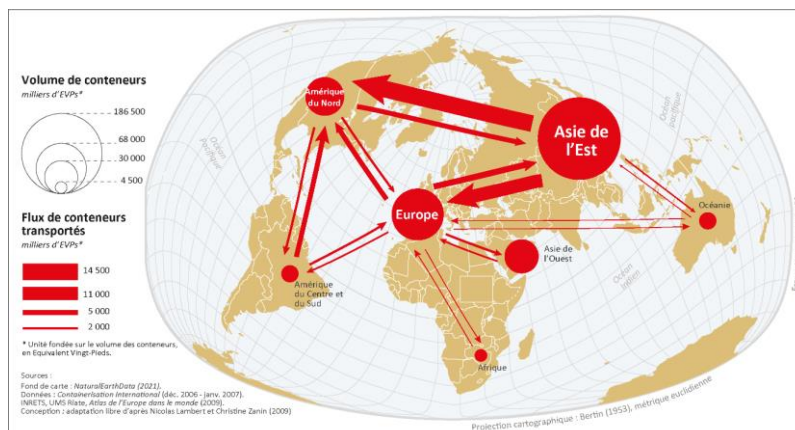


Figure 4.13. Mondialisation des flux commerciaux (variante curvilinéaire)

La variation des positions des lieux opérée à la suite d'un changement de projection se répercute sur leurs espacements et, en conséquence, sur la longueur des lignes de flux. Cette variation des longueurs illustre d'ailleurs le rôle fondamental de l'espace géographique, *via* cette transcription cartographique de la distance parcourue. Le changement de projection ne suffit pas à lui seul à générer une image formellement « plus juste », le problème tenant avant tout à la forme/morphologie des lignes. Pour y remédier, l'utilisation de lignes droites (plus généralement de géodésiques) permet une expression des flux au plus près des données mobilisées, c'est-à-dire dans la métrique euclidienne, pour une représentation selon une logique de flux (figure 4.14).



Communication cartographique : sémiologie graphique, sémiotique et géovisualisation
coordonné par Mericskay. © ISTE Editions 2021.

Figure 4.14. *Mondialisation des flux commerciaux (variante rectilinéaire).*

Les flux cartographiés ci-dessus décrivent un transport de conteneurs réalisé entre des macrorégions mondiales, selon un mode de transport dont on peut raisonnablement supposer qu'il est maritime. Par ailleurs, ces flux sont de fait soumis à une contrainte liée à l'alternance Terres/Mers qui induit une prise en compte de « l'effet d'itinéraire ».

4.4.1.2 *L'effet d'itinéraire et la sinuosité des lignes*

« L'effet d'itinéraire » impose de suivre une route dans un espace donné (une route maritime par exemple), de considérer la géographie des espaces traversés en lien avec le déplacement dont il est question. Ne pas en tenir compte, c'est prendre le risque d'une carte décrivant une situation impossible dans la réalité (par exemple, des navires qui franchissent des espaces continentaux). Deux cas sont dès lors envisageables, selon que la route empruntée est connue avec précision ou non, cette information sur la route étant généralement déconnectée de celle sur les quantités transportées (figure 4.15).

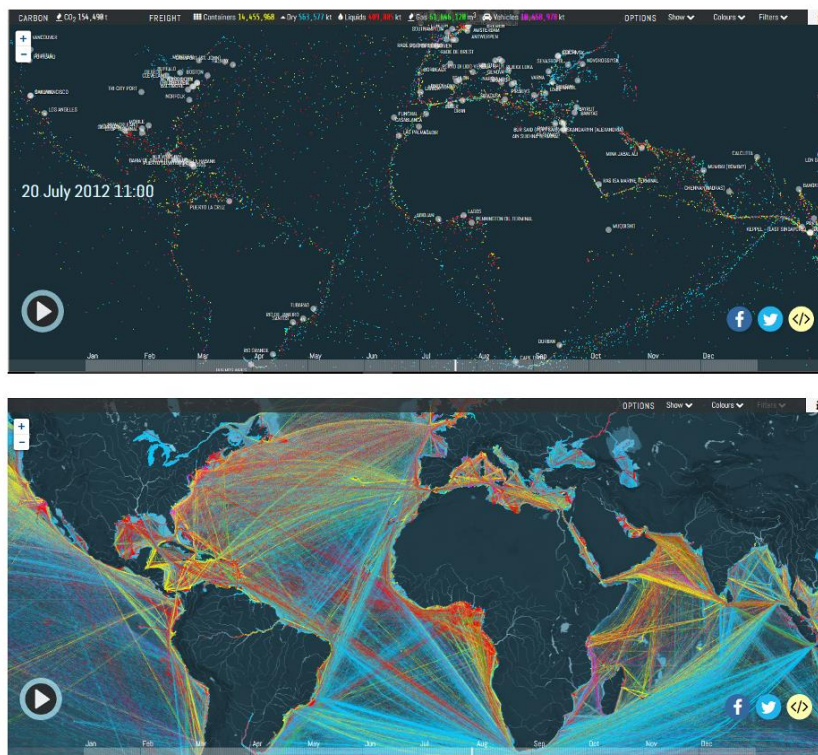


Figure 4.15. *Densité de la circulation maritime mondiale (source : Shipmap.org)*

Les routes maritimes empruntées par les navires, si elles sont bien connues et peuvent être géovisualisées en temps réel sur le web, ne décrivent que la densité de la circulation maritime, pas leur sémantique. La représentation (le tracé) des routes maritimes issue des données AIS¹⁹ proposées par AISHub pour les antennes terrestres, Vessel Finder ou encore Marine Traffic renseigne sur la densité des lignes, éventuellement sur leur fréquence en fonction des types de navires. Elles n’informent ni sur le contenu, ni sur les quantités transportées par les navires, sauf lorsqu’elles peuvent être appariées avec d’autres bases de données qui permettent de les caractériser, comme celle de la base Navires²⁰ de l’IHS Markit Lloyd’s Fairplay,

¹⁹ Les données AIS sont issues de la captation automatique d’informations en temps réel émises par des signaux radio et satellites provenant de navires. Elles renseignent sur le type de navire et sur sa route (position géographique, port d’origine, port de destination, et cargaison).

²⁰ La base Navires de la Lloyd’s fournit des informations permettant de caractériser l’ensemble des navires avec une profondeur temporelle à savoir : les numéros IMO et MMSI

qui est la plus complète (Kerbiriou et Serry 2021). Ces lignes ne renseignent pas sur les caractéristiques du transport que ces routes supportent, elles éclairent seulement sur une densité de trafic. C'est pour cela que ces cartes sont élaborées selon une logique de liens, où les lignes présentent une largeur unique (figure 4.15).

Dans le second cas, celui où la route marchande est inconnue, deux choix supplémentaires sont envisageables : d'une part, celui de faire fi de la géographie des espaces traversés par ces navires en représentant le transfert de ces quantités de conteneurs comme précédemment ; d'autre part, celui de considérer la géographie de ce transport, mais de manière approximative puisque l'information précise nous est inconnue. On notera qu'en la matière, il est plus facile d'estimer approximativement la trajectoire cartographique de navires dont on connaît les quantités, les fréquences, les pavillons, etc., plutôt que d'estimer les quantités à partir d'une collection de trajectoires spatio-temporelles précises.

4.4.2. L'espace géographique dans la représentation de flux mondiaux

Ne pas considérer la géographie des positions des OD dans la représentation cartographique de flux mondiaux (ou à d'autres échelles géographiques) ne pose pas de problème en soi puisque la méthode cartographique mise en œuvre suivant une logique de flux, ne considère pas l'espace des positions dans la représentation. L'espace n'y est mobilisé que dans l'habillage de la carte (fond de carte).

Dans une carte de flux, le découpage territorial intervient généralement lors de la projection de la carte (*via* l'implantation spatiale) et lors de sa conception finale, pour contextualiser les signes et aider à l'interprétation. Il est donc possible de supprimer ce fond de carte, sans que la nature de l'information perçue en soit modifiée (figure 4.16).

d'identification du navire, le type, la taille, la capacité, propriétaire, opérateur (Kerbiriou et Serry 2021).

Communication cartographique : sémiologie graphique, sémiotique et géovisualisation
coordonné par Mericskay. © ISTE Editions 2021.

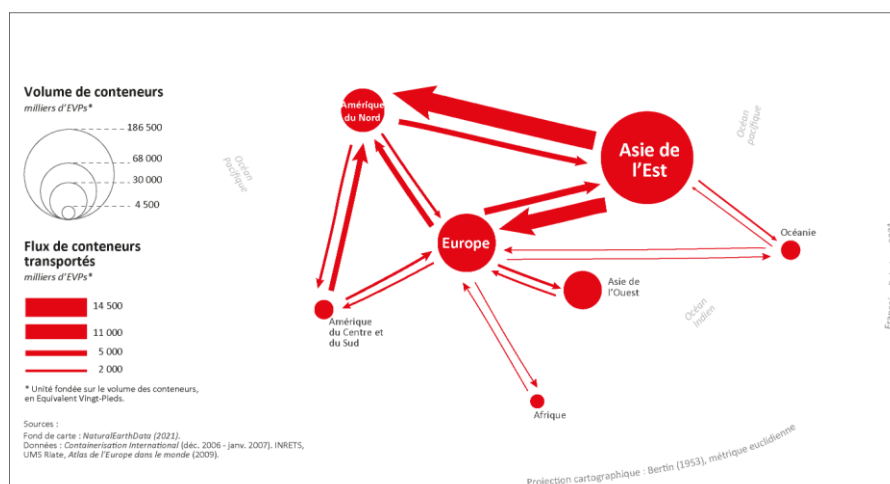


Figure 4.16. Mondialisation des flux commerciaux (logique de flux)

Le fond de carte étant supprimé, il n'est plus indispensable de conserver les positions géographiques des lieux. La suppression de la géographie autorise à la limite un changement d'espace, à savoir la projection de ces macrorégions dans un espace géométrique non nécessairement géographique.

Sur le plan théorique, on passe d'un raisonnement selon une logique de flux à une logique de liens (en référence à la théorie des graphes) qui considère une matrice d'adjacence²¹ où ce qui compte, avant tout, ce sont les positions des sommets (traduisant les lieux) dans le plan (figure 4.17). En d'autres termes, la représentation est non plus vraiment une carte mais davantage un graphe modélisant le système mondial d'échanges de conteneurs. Les liens de ce graphe spatialisé peuvent également être pondérés, de manière à enrichir *a minima* la représentation par la connaissance des quantités de conteneurs ; aussi orientés par la mention du sens (ou de l'orientation) de circulation des navires, comme sur la figure 4.16, voire colorés en fonction du type de navire, de son pavillon et ainsi de suite

²¹ Une matrice d'adjacence est une matrice de flux binaire : ses cellules sont remplies de 1 et de 0 signifiant respectivement l'existence ou l'absence de lien entre les OD.

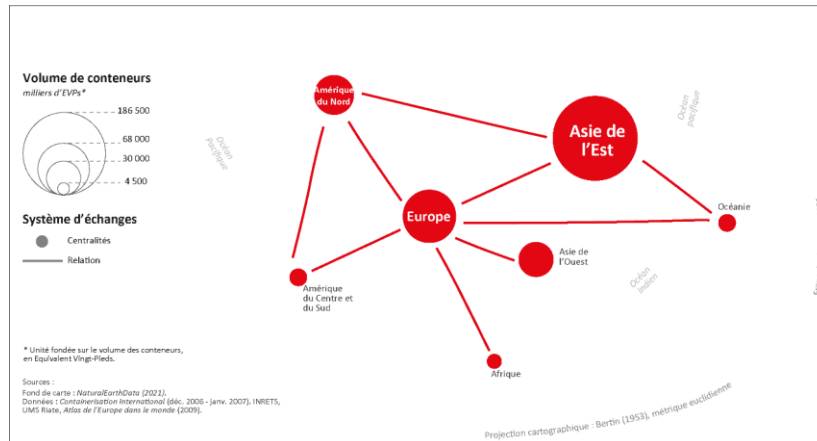
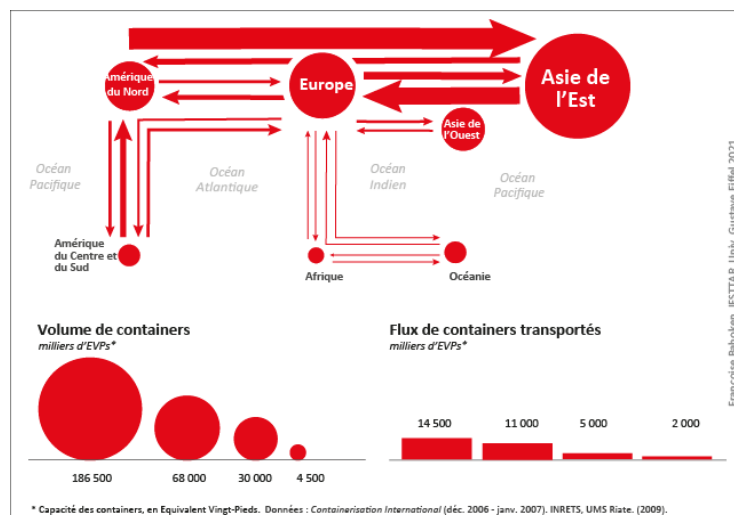


Figure 4.17. Mondialisation des flux commerciaux (logique de liens).

Appliquer une logique de liens, dans le cadre de la théorie des graphes, conduit à repositionner les lieux de ce commerce maritime, pour communiquer sur sa structuration au niveau mondial, sur la morphologie du système relationnel (figure 4.18) et non plus sur leur géographie. Cette redistribution des éléments modifie la nature de la représentation de ces flux, le type de document (carte de flux/graphe de flux) et la nature de l'information communiquée : relationnelle structurelle/géographique.



Communication cartographique : sémiologie graphique, sémiotique et géovisualisation coordonné par Mericskay. © ISTE Editions 2021.

Figure 4.18. Structure du transport maritime conteneurisé.

D'une carte à un graphe, cette dernière image tient davantage de l'infographie en proposant au lecteur une vision simplifiée et schématisée des flux commerciaux mondiaux. La morphologie générale de ce système d'échanges conteneurisés est présentée selon une double échelle géographique : entre les pôles majeurs et un réseau régional secondaire (Brésil, Russie, Inde, Chine et Afrique du Sud - BRICS).

4.4.3. Approximer l'espace dans la représentation de flux mondiaux

Plutôt que d'omettre complètement l'espace géographique de la représentation de ces flux, il est également possible de le réintroduire de manière approximative (imprécise), puisque nous n'en avons pas la connaissance exacte. Pour cela, il convient d'adopter un raisonnement selon une **logique de mouvements**. Une dernière piste pour représenter ces mouvements conteneurisés dans une perspective cartographique géographique consiste donc à contraindre l'expression des tracés dans l'espace maritime, à contourner les terres (pour respecter l'effet d'itinéraire). Sachant que l'essentiel des échanges commerciaux effectués entre l'Asie et l'Europe passe par le détroit de Malacca (pour ne citer que cet exemple), contraindre les flux à emprunter cette voie permet de réconcilier leur expression cartographique avec une réalité du monde du transport maritime.

Pour cela, il « suffit » d'intégrer *a minima* l'effet d'itinéraire au processus de cartographie, ce qui conduit à un changement de raisonnement, à l'adoption d'une logique de mouvements à mettre en œuvre sur une projection adéquate, faute de quoi la cartes souffrira de « l'effet de jointure » (figure 4.19).

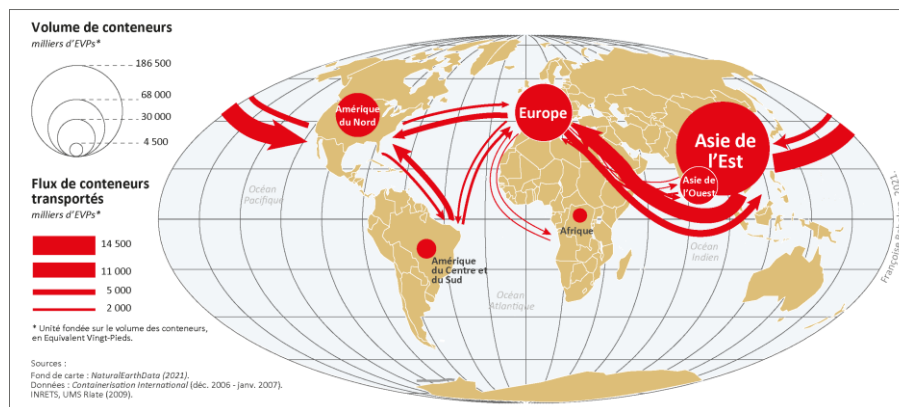


Figure 4.19. Mondialisation des flux commerciaux d'origine asiatique (variante sinueuse - logique de mouvements avec « effet de jointure »)

La projection polaire fait partie de celles qui autorisent une continuité territoriale annihilant l'effet de jointure, y compris pour des mouvements maritimes s'exprimant à longue voire très longue distance ; elle autorise ainsi la géovisualisation de l'ensemble de ces flux en minimisant les distorsions (figure 4.20).

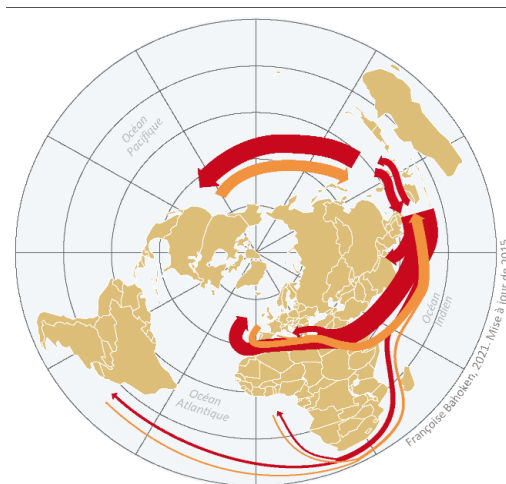


Figure 4.20. Mondialisation des flux commerciaux d'origine asiatique (variante sinueuse - logique de mouvements en projection polaire).

L'objectif de visualiser sur une carte mondiale l'emprise des acteurs centraux ou majeurs domine depuis de nombreuses années, et se maintient dans certains cas. Celui de communiquer par la carte sa maîtrise du monde est cependant si prégnant que des cartographes ont pu caractériser certains problèmes méthodologiques en les associant directement au besoin de (se) représenter des puissances mondiales. Le cartographe Harrison (1940) par exemple, en qualifiant la planche qu'il publie dans un Atlas *Fortune* de « problème américain/britannique », montre qu'il perçoit « l'effet d'itinéraire » comme une impossibilité à exposer l'ampleur de la couverture spatiale des puissances économiques du moment.

La prise en compte de l'espace dans la représentation cartographique des mouvements maritimes limite logiquement leur représentation par la nécessité de

leur spatialisation dans l'espace maritime, pour tenir compte des contraintes liées au niveau Monde. Seule une connaissance fine des routes associées aux quantités transportées permettrait une représentation précise de la réalité de ce transport, ce qui n'est généralement pas possible, comme mentionné.

4.5. Conclusion sur l'information communiquée par une (carto)graphie thématique de flux et mouvements

Les cartes présentées dans cet exercice de multireprésentation, bien que produites avec les mêmes données, diffèrent par leurs motifs apparents qui intègrent plus ou moins précisément les principaux enjeux spatiaux de la cartographie de ces flux commerciaux au niveau mondial. La figure 4.21 présente un premier tableau de synthèse comparant la prise en compte des spécificités de la mise en cartes et graphiques de ces flux mondiaux dans les différentes versions proposées. Chacune des cartes (en ligne) est associée à trois familles de caractéristiques (en colonnes) :

- le niveau de la perception graphique lié à la perception d'une complexité relevant de l'information représentée ou de sa traduction graphique ;

- les enjeux généraux de la cartographie de flux que sont les « effets spaghetti » et « effets d'amalgame » ;

- les enjeux spécifiques de la carte de flux s'exprimant au niveau Monde, qui sont liés à la présentation d'un contexte géographique, à la prise en compte des « effets d'alignement », « effet d'itinéraire » et « effet de jointure » (ainsi qu'à la correspondance supposée entre la « distance cartographique » perçue et la distance effectivement parcourue dans la réalité, pour représenter ces échanges commerciaux conteneurisés.

Image	Niveau de perception graphique	Enjeux généraux		Enjeux spatiaux au niveau Monde				
		Effet spaghetti*	Effet d'amalgame	Contexte géographique	Effet d'alignement	Effet d'itinéraire	Effet de jointure	Distance cartographique
	Faible	Oui	Oui	Oui	Non	Non	Oui	Sous-estimée
	Moyen	Non	Non	Oui	Non	Non	Oui	Surestimée
	Moyen	Non	Non	Oui	Oui	Non	Oui	Surestimée
	Bon	Non	Non	Oui	Oui	Non	Oui	Sous-estimée
	Bon	Non	Non	Oui	Oui	Oui	Non	Approximée
	Très bon	Non	Non	Oui	Oui	Oui	Oui	Approximée
	Bon	Non	Non	Non	Non	Non	NC	Eludée
	Très bon	Non	Non	Non	Oui	Non	NC	Eludée

* L'effet spaghetti est par définition faible pour ce niveau de flux agrégés en macros-régions économiques.

Figure 4.21. Synthèse de la gestion des enjeux de la cartographie de flux mondiaux

On observe ainsi que le niveau de perception graphique d'ensemble est très bon dans deux cas de figures qui sont opposés : lorsque l'image intègre l'espace géographique dans le dessin cartographique de la ligne de flux et lorsque ce dernier n'est pas pris en compte.

Les mouvements maritimes mondiaux cartographiés sous la forme d'une ligne sinieuse approxinant les routes maritimes et selon une projection cartographique qui respecte leur continuité spatiale, présentent un très bon niveau de perception graphique. Si la non-considération de « l'effet de jointure » pose surtout un problème d'interprétation thématique, suggérant une interruption dans l'opération de transport réalisée, la représentation cartographique, parce qu'elle suggère les routes empruntées, est toutefois considérée comme présentant un bon niveau de perception graphique.

Le niveau de perception graphique est également très bon, lorsque ces mêmes mouvements font fi de l'espace géographique et des questions liées à la perception de la « distance cartographique ». Leur représentation sous la forme d'un graphe de flux a-spatial montre la morphologie du système d'échanges maritimes plus que leur géographie, laquelle est accessible à un second niveau de lecture par la mention de

Communication cartographique : sémiologie graphique, sémiotique et géovisualisation
coordonné par Mericskay. © ISTE Editions 2021.

toponymes. Un seul effet n'est pas pris en compte par ces graphes, celui d'alignement, potentiellement résolu par un placement adéquat des différents lieux. L'efficacité dans la représentation de données relationnelles sous la forme d'un graphe, reliant des acteurs localisés ou non, tient en effet dans le placement judicieux des nœuds pour faire voir des centralités structurant ou non des communautés, d'éventuelles hiérarchies entre les lieux.

Les représentations de ces flux qui apparaissent les moins efficaces, de notre point de vue, sont celles qui s'accommodent mal avec l'espace géographique soit parce qu'elles l'éluent, soit parce qu'elles le surestiment. Dans ce cas, elles proposent une vision exagérée de la « distance cartographique » liée au truchement d'effets de styles conduisant à incurver la courbe de la ligne/flèche. Si les images obtenues sont effectivement plus esthétiques et plus agréables à regarder que celles mettant en œuvre des lignes droites, le problème est qu'elles sont dans le même temps peu signifiantes. Elles communiquent une information d'autant plus erronée que la déformation graphique serait importante, par l'apport d'une distorsion abusive de l'information représentée (on notera également que leur niveau de perception graphique de ces images surestimant l'espace est considéré comme moyen).

Ainsi, à défaut de pouvoir estimer correctement les routes effectivement empruntées dans la réalité, plutôt que d'user d'artifices esthétiques donnant l'illusion de la représentation d'un mouvement, il est préférable de sous-estimer le rôle de l'espace géographique en recourant à la métrique euclidienne mise en œuvre dans une projection adéquate à l'échelon représenté. Le niveau de perception graphique sera malgré tout bon, car seul « l'effet d'itinéraire » sera non pris en compte.

L'apparente diversité de la série de cartes proposée tient à la manière dont les différents enjeux sont pris en compte. L'expression variée des motifs cartographiques qui en découlent dépend en réalité du raisonnement théorique sous-jacent dont résulte les considérations (carto)graphiques évoquées.

La figure 4.21 présente un second tableau de synthèse où les différentes images cartes participent soit d'un raisonnement géographique (gravitaire), soit d'un raisonnement morphologique (réticulaire). Leurs différences conceptuelles sont renforcées par la manière dont elles considèrent l'espace de ce système d'échanges maritimes conteneurisés. Ces deux grandes familles de raisonnements sont caractérisées en colonne par un type d'image, respectivement une carte de flux/mouvements et un graphe de flux munis d'avantages et d'inconvénients.






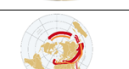


Raisonnement	Type	Image	Information communiquée	
			Avantages	Inconvénients
Géographique	carte de flux		Vue d'une géographie générale du système d'échanges.	Visualisation formellement imparfaite. Confusion dans la perception des quantités échangées. Effet d'amalgame
	carte de flux		Perception claire des quantités échangées et s'exprimant à deux échelles géographiques. Amélioration esthétique par les courbes.	Visualisations imparfaites bien que très esthétiques. Informations de flux travesties par la courbure des lignes qui augmente artificiellement la distance cartographique perçue et modifie l'organisation générale du transport.
	carte de flux		Distinction de la Triade et d'une organisation centre-périphérie.	
	carte de flux		Vue la plus correcte dans la métrique euclidienne.	Enjeux spatiaux au niveau Monde non pris en compte
	Carte de mouvements		Perception générale de la géographie du mouvement de transports maritime.	Enjeux spatiaux au niveau Monde insuffisamment pris en compte
	Carte de mouvements		Perception générale de la géographie du mouvement de transports maritime. Réconcilie la cartographie de flux avec le transport maritime	Représentation "approximative" des routes.
Morphologique	Graphe		Perception correcte de la structure du système de transport maritime : de la hiérarchie des lieux et des quantités échangées.	Absence de la géographie des transports (sauf lecture des labels). Défaut de perception des quantités.
	Graphe de flux		Vue la plus intéressante de la morphologie du système de transport analysé. Géographie perceptible par la mention de labels.	Infographie qui ne relève plus de la cartographie. Elude la géographie des échanges à la faveur de la morphologie du système.

Figure 4.21. Synthèse des avantages et inconvénients des différentes cartes

La carte et le graphe de flux présentent des avantages et inconvénients pour communiquer graphiquement une information sur ces flux. Au-delà de différences pour traduire un message, ces deux formes de représentation (carto)graphique sont non pas opposées mais complémentaires en termes de communication. Elles conduisent en effet à apporter aux lecteurs différentes visions de ces échanges et autorisent plusieurs interprétations liées au choix du type de représentation. C'est bien avant tout l'intention du ou de la cartographe qui prime pour montrer soit la structure générale du système d'échanges (grâce à l'infographie) ou la géographie de ce même système, représentée avec une projection classique ou polaire, par exemple pour attirer l'attention sur des centralités commerciales (ainsi la Triade, par exemple).

Si graphes et cartes participent de raisonnements complémentaires, les enjeux de leur représentation soulèvent également des questions de rhétorique liées à la réception du message de la carte par un public donné. En effet, au-delà des aspects

théoriques et méthodologiques, au-delà de la conception d'ensemble, la cartographie de flux mondiaux, à l'instar des autres types de cartes, est fonction de la thématique des transferts et échanges entre OD traités.

La perception des échanges varie selon que le support est statique ou interactif. L'existence de nouvelles possibilités de géovisualisation dynamique, interactive ou animée des flux/mouvements permet de renouveler les modalités de représentation et surtout les modes d'interaction entre utilisateurs, cartes et données. Cependant, les possibilités actuelles intègrent encore mal leur réception, ce qui pose à nouveau la question de la rhétorique de la carte en lien avec les outils mobilisés.

Si « l'effet spaghetti » est le premier problème qu'il convient de résoudre pour obtenir une carte intéressante, c'est également le plus important, car il concerne toutes les cartes de flux et de mouvements – quelle que soit leur échelle – dès lors qu'elles mobilisent plus d'une dizaine de couples de lieux OD. D'autres effets peuvent ensuite se manifester en fonction de la thématique dont il est question et de l'intention du ou de la cartographe. Des mouvements économiques décrivant des circulations maritimes ne mobilisent pas les mêmes ressorts cognitifs, sociaux et géopolitiques (Bacon *et al.* 2016) que ceux décrivant des mouvements démographiques. Quand bien même les signes graphiques utilisés (des points, des lignes/flèches) seraient similaires, le fait que leur sémantique et leurs interprétations diffèrent impose une attention particulière à leurs représentations.

Le présent chapitre a focalisé l'attention sur la représentation de flux commerciaux mondiaux, mettant ainsi en évidence le rôle d'enjeux spatiaux spécifiques (liés aux effets d'alignement, d'itinéraire et de jointure). Si nous avons mobilisé d'autres catégories de flux et mouvements, nous aurions parfois été confrontés à d'autres enjeux pour leur représentation. Le cas des mouvements migratoires, par exemple, pose des problèmes spécifiques qui sont avant tout liés au contexte géopolitique du moment et à des considérations humanistes relevant des droits de l'Homme qui imposent une attention particulière – une fois les données traitées – à la rhétorique et au style de la carte : au choix des mots, des formes, des couleurs, des signes ; ces derniers pouvant révéler un problème spécifique, tel celui de la flèche qui, parce qu'elle évoque notamment une métaphore guerrière, l'envahissements d'ennemis, a pu questionner la réception de la représentation cartographique de certaines migrations humaines observées à l'échelle internationale.

4.6. Bibliographie

- Amilhat Szary, A.-L. (2018). *Qu'est-ce qu'une frontière aujourd'hui ?*, Presses Universitaires de France, Paris.
- Bacon, L., Clochard, O., Honoré, T., Lambert, N., Mekdjian, S., Rekacewicz, P. (2016). Cartographier les mouvements migratoires, *Revue européenne des migrations internationales*, 32(3-4), 185-214.
- Bahoken, F., (2014a). Pour le renouvellement de la sémiologie de la carte de flux, *Cartes et Géomatique*, 222, 109-121.
- Bahoken, F., (2014b). Éléments pour une représentation (carto)graphique des matrices de flux, *Mappemonde*, 115. [En ligne]. Disponible à l'adresse : <http://mappemonde.mgm.fr/num43/articles/art14304.html> [Consulté le 12 juillet 2021].
- Bahoken, F., (2016). Contribution à la cartographie d'une matrice de flux. Thèse de doctorat, Université Denis Diderot, Paris 7.
- Bahoken, F., (2016a). L'approche cartographique de la décomposition des matrices de flux, *Mappemonde*, 116. [En ligne]. Disponible à l'adresse : <http://mappemonde-archive.mgm.fr/num44/articles/art14404.html> [Consulté le 12 juillet 2021].
- Bahoken, F., (2019). L'évolution de l'image cartographique du flux au prisme de l'analyse des interactions spatiales, *Siècles* [En ligne]. Disponible à l'adresse : <http://journals.openedition.org/siecles/4142> [Consulté le 12 juillet 2014].
- Bahoken, F., Grasland C., Zanin C. (2016). D'une cartographie de flux à une cartographie du mouvement. Aspects sémiologiques. *Cartes et Géomatique*, 229-230, 65-74.
- Bahoken, F., Jégou, L., Lagarde, D., Lambert, N. (2020). La séduction des cartes du *geoweb*. Le cas des flux de migrants internationaux, *Cybergeo : European Journal of Geography* [En ligne]. Disponible à l'adresse : <http://journals.openedition.org/cybergeo/33792> [Consulté le 12 juillet 2014].
- Bahoken, F., Lambert, N. (2020). Méfiez-vous des cartes, pas des migrants, *AntiAtlas journal*. [En ligne]. Disponible à l'adresse : <https://www.antiatlas-journal.net/04-mefiez-vous-des-cartes-pas-des-migrants/> [Consulté le 12 juillet 2014].
- Bertin, J. (1967). *Sémiologie graphique. Les diagrammes, les réseaux, les cartes*, Gauthier-Villars-Mouton, Paris.

- Boyandin, I. (2010), Using Flow Maps to Explore Migrations Over Time, *Proceedings of the International Conference on Geographical systems AGILE' 2010*, Guimarães.
- Boyandin, I., Bertini, E., Bak, P., Lalanne, D. (2011). Flowstrates : An Approach for Visual Exploration of Temporal Origin-Destination Data, *Proceedings of the Computer Graphics Forum*, 30(3), 971–980.
- Cauvin, C. (1997). Au sujet des transformations cartographiques de position, *Cybergeo : European Journal of Geography*. Cartographie, Imagerie, SIG [En ligne]. Disponible à l'adresse : <http://journals.openedition.org/cybergeo/5385> [Consulté le 13 juillet 2021].
- Cauvin, C. (2020). Waldo Tobler, *Hypergéométrie* [En ligne]. Disponible à l'adresse : <https://www.hypergeo.eu/spip.php?article763> [Consulté le 12 juillet 2021].
- Cauvin, C., Reymond, H. (1991). Interaction spatiale et cartographie : les solutions de W. Tobler. *Espace, Populations, Sociétés*, 3, 467-485.
- Claudiel, M., Nagel, T., Ratti, C. (2016). From origins to destinations: the past, present and future of visualizing flow maps. *Built Environment*, 42(3), 338-355.
- Côme, E., Bapaume, T., Jégou, L., Bahoken, F., Maisonobe, M., Roelandt, N., Le Champion, G. (2019), Arabesque, application d'exploration et de géovisualisation de données de flux et de réseaux, *Actes de la conférence internationale de géomatique (SAGEO'2019)*, Clermont-Ferrand, 265-264.
- Côme, E., Bahoken, F., Lambert, N. (2021), Winds, A tribute to Tobler, *Recueil des contributions au Colloque Cartomob*, Toulouse, 161-162.
- Didelon, C. (2013). Le Monde comme territoire ; pour une approche renouvelée du Monde en géographie, Habilitation à diriger des recherches, Université de Rouen.
- Didelon, C., Grasland, C., Richard, Y. (2008). *Atlas de l'Europe dans le monde*. La Documentation française, Paris.
- Grasland, C. (2010), Spatial Analysis of Social Facts, A tentative theoretical framework derived from Tobler's first law of geography and Blau's multilevel structural theory of society. Dans *Handbook on Theoretical and Quantitative Geography*, Bavaud, F., Mager, C. (dir), FGSE Workshop series, Faculté des géosciences et de l'environnement. Disponible à l'adresse : <https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-00410669v2> [Consulté le 21 juillet 2021]
- Grootens, J., Rendgen, S. (2020). *Le système Minard : anthologie des représentations statistiques de Charles-Joseph Minard*. Éditions B42, Paris.

- Holten, D. (2006). Hierarchical edge bundles: Visualization of adjacency relations in hierarchical data, *Proceedings of the IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 12(5), 741-748.
- Jenny, B., Stephen, D. M., Muehlenhaus, I., Marston, B. E., Sharma, R., Zhang, E. et Jenny, H. (2018). Design principles for origin-destination flow maps. *Cartography and Geographic Information Science*, 45(1), 62-75.
- Joliveau, T. (2010). Le géoweb, un nouveau défi pour les bases de données géographiques, *L'Espace géographique*, 2(40), 154-163.
- Kerbiriou, R., Serry, A (2021). Les signaux AIS et la cartographie de la circulation maritime, *Recueil des contributions au Colloque Cartomob*, Toulouse, 43-53.
- Lambert, A., Aubert, D., Mélançon, G. (2010). Living flows: enhanced exploration of edge-bundled graphs based on GPU-intensive edge rendering, *Proceeding of the 14th International Conference on Information Visualization*, 523-530.
- Lambert, N., Bahoken, F., Côme, E. (2021). Vers une relecture du Flowmapper, *Recueil des contributions au Colloque Cartomob*, Toulouse, 163-171.
- MacEachren, A.M. (1995). *How Maps Work: Representation, Visualization and Design*, The Guilford Press, New York.
- Mericskay, B. (2016). La cartographie à l'heure du géoweb : retour sur les nouveaux modes de représentation spatiale des données numériques. *Cartes et Géomatique*, 229-230, 37-50.
- Nystuen, J.D., Dacey, M.F. (1961). A graph theory interpretation of nodal regions, *Papers and proceeding of the Regional Science Association*, 7(1), 29-42.
- Palsky, G. (1996). *Des chiffres et des cartes. Naissance et développement de la cartographie quantitative française au XIX^e siècle*, Comité des travaux historiques, Paris.
- Phan, D., Xiao, L., Yeh, R., Hanrahan, P., Winograd, T. (2005), Flow Map Layout, *Proceedings of IEEE Symposium on Information Visualization, INFOVIS 2005*, 219-224.
- Plantin, J.-C. (2012). Les pratiques de cartographie numérique en ligne. Expression, remédiation, circulation. Thèse de doctorat. Université de Technologie de Compiègne.
- Poulain, M. (1981). Contribution à l'analyse spatiale d'une matrice de migrations internes, Thèse de doctorat, Université de Louvain La Neuve, Cavey.
- Ravenstein, E.G. (1885). The Laws of Migration, *Journal of the Statistical Society of London*, 48(2), 167-235.

- Ravenstein, E.G. (1889). The Laws of Migration, Second Paper, *Journal of the Statistical Society of London*, 52(2), 241-305.
- Thornthwaite, C.W. (1934). Internal migration in the United States, Bulletin number one. Study of population redistribution, University of Pennsylvania, Wharton School of Finance and Commerce, Industrial Research Department.
- Tobler, W.R. (1970a). A computer movie simulating urban growth in the Detroit region, *Economic Geography*, 46(2), 234-240.
- Tobler, W.R. (1970b). Experiments in migration mapping by computer, *The American Cartographer*, 14(2), 155-163.
- Tobler, W.R. (1979a). Estimations of attractivities from interactions, *Environment and Planning A*, 11(2), 121-127.
- Tobler, W.R. (1979b). A geographical flow mapping program, *Geographical Analysis*, (13)1, 1-20.
- Tobler, W.R. (1981). A model of geographical movement, *The Geographical Analysis*, 13(1), 1-20.
- Tobler, W.R. (1982). Cartographic study of movement tables, *Presentation in the Mapping National Computer Graphics, Session on Statistical Graphics – Anaheim.US*.
- Tobler, W.R. (1987). Experiments in migration mapping by computer, *The American Cartographer*, 14(2), 155-163.
- Tobler, W.R. (1995). Migration Ravenstein, Thorntwaite, and Beyond, *Urban Geography*, 16(4), 327-343.
- Tobler, W.R. (2012). Migrations: maps and models. Conference. Présentation PowerPoint. University of California, San Bernardino.
- Tobler, W.R., (n.d.). *On viewing flow map*, Note de recherche non publiée.