



# D'UNE CARTOGRAPHIE DE FLUX A UNE CARTOGRAPHIE DU MOUVEMENT

## Aspects sémiologiques

*par* Françoise BAHOKEN

*Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux  
Département Aménagement, Mobilités, Environnement (AME) – Laboratoire Splott,  
UMR Géographie-Cités – Equipe PARIS  
francoise.bahoken@ifsttar.fr*

*et par* Claude Grasland, Christine ZANIN

*Université Paris Denis Diderot (Paris 7)  
UMR Géographie-Cités – Equipe PARIS  
UMS RLATE  
claudе.grasland@parisgeo.cnrs.fr ; christine.zanin@univ-paris-diderot.fr*

---

### Résumé

*La cartographie d'une matrice de flux apparaît invariante quel que soit l'outil, le support, l'échelle géographique ou encore la thématique. L'est-elle réellement ? La méthode est fort répandue et plutôt bien connue. Elle caractérise une « logique de flux » qui consiste à mobiliser un figuré linéaire, souvent orienté (une flèche, par exemple), dont la largeur est proportionnelle à la valeur de flux correspondante. Cette méthode est-elle pertinente ?*

*Cet article pour objectif de démontrer ce que signifie « représenter des flux sur une carte », c'est-à-dire dans un espace bidimensionnel assorti d'une métrique que l'on considère géographique. Le cadre d'analyse sémiotique mobilisé permet d'examiner le signifiant et le signifié du figuré qui symbolise le flux. Si la pertinence de la « logique de flux » est avérée, nous montrons d'une part, que ce n'est que par l'introduction d'une « logique de mouvements » que la prise en compte de l'espace dans le processus cartographique est effective, d'autre part, que sa mise en œuvre conduit, nécessairement, à une approximation de la représentation du mouvement dans l'espace, principalement en raison du rôle également joué par la perception de la « distance cartographique » symbolisant la distance effectivement parcourue dans la réalité.*

**Mots-clés :** *matrice de flux, carte de flux, carte de mouvements, sémiotique, figuré, distance cartographique,*

## Introduction

On admet généralement sans discussions que la cartographie d'une matrice de flux agrégés de lieu à lieu consiste à représenter ses valeurs sur un fond de carte, en mobilisant un figuré linéaire de « largeur » proportionnelle à la valeur de flux correspondante. Cette pratique, bien connue, est-elle pertinente ?

Nous émettons un doute raisonnable quant à sa validité, dans la mesure où elle suppose que l'œil humain ne perçoit que les variations de « largeur » des figurés qui illustrent les flux, qu'elles seules seraient pertinentes pour symboliser des flux. Est-ce vraiment le cas ? Est-il si évident que cela de réaliser des cartes de flux en ne mobilisant qu'une seule dimension du figuré alors que l'œil humain en perçoit plusieurs ?

Il est en effet possible de montrer, moyennant l'utilisation de la variable visuelle (v. v.) *Transparence*, qui révèle un « effet de profondeur » des motifs de flux, que l'œil humain perçoit simultanément plusieurs dimensions des figurés (Bahoken, 2014a). C'est pourquoi, nous proposons de lever ce doute en examinant le processus de construction cartographique du flux, que nous définissons comme suit.

**Définition du flux (Fij) :** le flux est la mesure d'une quantité transférée depuis un lieu d'Origine (i) vers un lieu (j) de Destination (OD), pendant une période (t). Il s'agit d'une donnée quantitative multidimensionnelle formée de quatre composantes : une thématique (z), deux coordonnées (x, y) définissant sa position dans un plan (xi, yi ; xj, yj) et une quatrième dans le temps (t). La donnée de flux correspond à un agrégat dont les caractéristiques individuelles ont été perdues lors de sa construction, de même que le cheminement spatiotemporel entre les OD n'est plus connu avec précision.

L'examen de la manière donc ce flux est cartographié nous conduit à raisonner comme J. Bertin (1967). Pour cela, nous allons adopter une approche sémiotique qui va nous conduire à déconstruire puis à reconstruire le processus de construction cartographique du flux. L'objectif est de démontrer, d'une part, la pertinence de la méthode classique de cartographie de flux, que nous qualifions ainsi de « *logique de flux* », d'autre part, le fait que celle-ci ne considère pas l'espace traversé par le flux, à l'inverse de la « *logique de mouvement* » que nous allons introduire. L'approche proposée étant théorique et conceptuelle, nous allons mobiliser des données réelles pour l'illustrer, une matrice de flux décrivant un volume bilatéral de flux internationaux s'exprimant à l'échelle mondiale, entre cinq pays.

Nous présentons, dans un premier temps, la grille d'analyse que nous mobilisons ainsi que les données empiriques que nous allons représenter, selon quatre hypothèses. Nous revenons ensuite sur la construction d'une carte de flux, selon une *logique de flux*, puis examinons la réalisation de cette même carte de flux selon une *logique de mouvement*.

## 1. Aspects cartographiques et sémantiques de la cartographie de flux

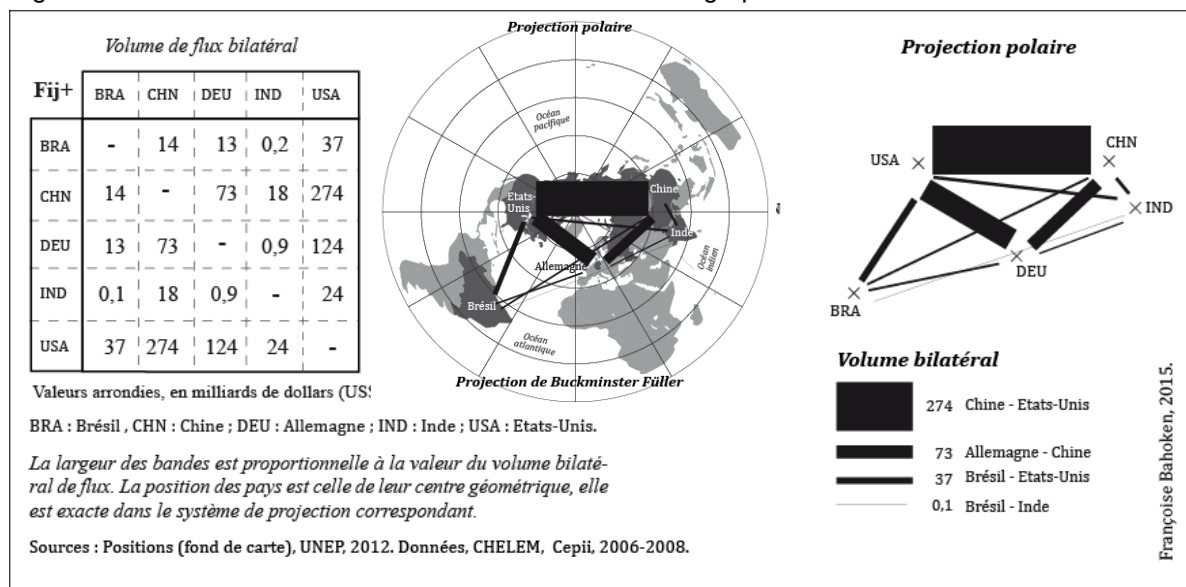
La réflexion que nous proposons considère le langage cartographique comme un mode d'expression aux conséquences cognitives de la perception du phénomène. Elle s'inscrit dans une grille d'analyse qui articule les aspects cartographiques, de la construction du figuré qui décrit le flux, et sémantiques de sa perception, de sa compréhension par un observateur statique.

## Présentation des données

Les données empiriques décrivant un volume bilatéral de flux internationaux mondiaux de marchandises échangés entre cinq pays. Elles correspondent à une sélection de la base de données CHELEM-CIN du Cepii, sur le commerce international, à trois dates : 2004, 2006, 2008. La matrice d'origine qui couvre l'ensemble des produits échangés entre 91 unités spatiales (pays ou groupes de pays) a toutefois été réduite aux cinq pays suivants : les Etats-Unis (USA), le Brésil (BRA), l'Allemagne (DEU), la Chine (CHN) et l'Inde (IND). Elle a également été agrégée en une période tri-annuelle pour des raisons de robustesse statistique, en particulier pour éviter les fluctuations exceptionnelles. La matrice (2004-2006) que nous avons utilisée décrit ainsi la moyenne mobile des valeurs de flux internationales sur les trois années. Ces valeurs correspondent au total de marchandises échangées entre ces cinq pays, exprimé en dollars américains courants (US \$).

La matrice étant symétrique (voir fig.1), donc de type  $(Fij)^+$ , sa représentation graphique est réalisée par un figuré non orienté, en l'occurrence une bande. Ces flux s'exprimant à l'échelle mondiale, nous proposons de les représenter selon une projection azimutale et équidistante, elle est centrée sur le pôle nord (polaire) et correspond à une vision du monde supposée correcte pour la représentation des flux. Cela étant, pour la démonstration, nous allons mobiliser les seuls figurés et non le fond de carte.

Figure 1. Présentation des données de flux et de leur cartographie

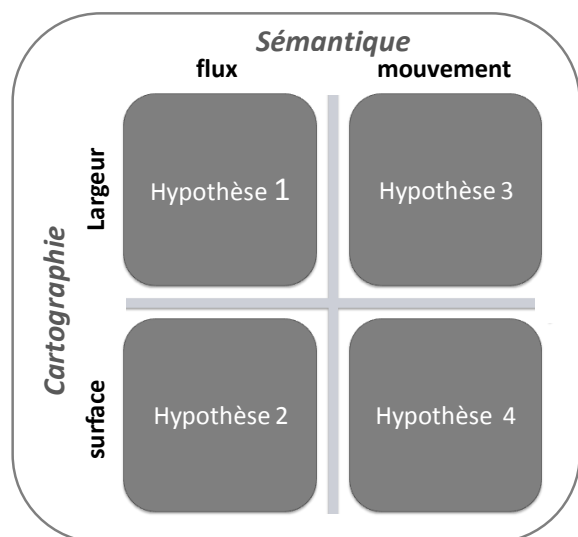


Pour analyser le processus cartographique sous-jacent au tracé de ces bandes, nous mobilisons la grille d'analyse sémiotique suivante.

## Présentation de la grille d'analyse sémiotique

La grille d'analyse sémiotique que nous mettons en œuvre articule les réflexions cartographiques et sémantiques qui conduisent à la cartographie d'un flux. La fig. 2 présente le cadre théorique correspondant. Nous l'illustrons en prenant l'exemple de la cartographie de  $(Fij)^+$  présentée sur la fig. 1.

Figure 2. Cadre sémiotique de réflexion sur la construction d'une carte de flux



La réflexion cartographique correspond au *signifiant*, c'est-à-dire au tracé du figuré (la bande) qui symbolise une valeur de volume de flux (voir Fig. 1). Ce tracé, géométrique, est formé de plusieurs dimensions mesurables : une largeur, une longueur et une surface. La réflexion sémantique concerne le *signifié* des dimensions du figuré qui est cartographié, c'est-à-dire la perception du *signifiant* suggérée par le mode de représentation (la bande) adopté.

Nous allons montrer que si cette perception est liée aux dimensions du figuré, elle est également fonction de la logique de raisonnement sous-jacente : d'une *logique de flux* ou d'une *logique de mouvements*, que nous allons respectivement présenter ci-après. Pour cela, nous allons ainsi examiner une série de quatre hypothèses, correspondant aux quatre cases de la grille (fig. 2) réparties selon ces deux logiques.

## 2. La construction d'une carte de flux selon une *logique de flux*

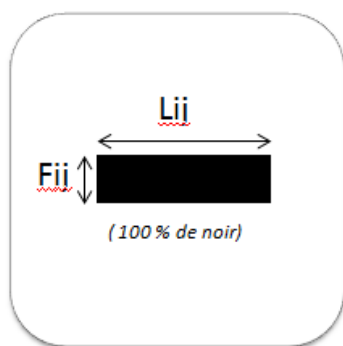
La *logique de flux* correspond aux hypothèses (hyp) n°1 et n°2 sur la fig. 1. Nous examinons ces deux possibilités dans les sections suivantes

### 2.1. L'hypothèse n°1 d'une perception des variations de largeurs des figurés

L'hyp. n°1 correspond à l'approche généralement<sup>1</sup> mise en œuvre pour cartographier des flux. Elle consiste à mobiliser la « largeur » du figuré, en rendant cette dimension proportionnelle à la valeur du flux ( $F_{ij}$ ) correspondante dans la matrice, en application du principe de sémiologie graphique appliqué à la v.v. Taille. Cette action est représentée sur la Fig. 1 (hyp. 1), son illustration est présentée sur la fig. 3.

<sup>1</sup> Certains auteurs mobilisent la *hauteur* du figuré, ce qui conduit à appliquer deux fois la v.v. *Taille*. Cette proposition n'est pas de nature à modifier notre raisonnement.

Figure 3. Illustration de l'hypothèse n°1.



Supposer cette première hypothèse exacte, c'est considérer, d'une part, que l'œil humain ne perçoit que les variations de « largeur » du figuré, donc ( $F_{ij}$ ) et non sa « longueur », notée ( $L_{ij}$ ) sur la fig. 3. Est-ce vraiment le cas ? La réponse apportée à ce stade est nécessairement négative.

Elle soulève, de fait, un doute quant à la pertinence de l'approche classique, fondée sur la mise en œuvre de la seule v.v. Taille. Pour autant, la méthode mise en œuvre n'est pas erronée, elle est même logique. L'espace géographique n'est pas pris en compte dans la cartographie de flux, car il ne l'est pas dans la définition du flux (que nous avons rappelée dans l'introduction).

C'est pourquoi la représentation (carto)graphique de cet agrégat consiste à tracer un lien ( $L_{ij}$ ) reliant les couples d'OD, puis éventuellement, à le valuer (i.e. à agir sur sa « largeur » en fonction de la valeur correspondante), comme sur la fig. 3. C'est d'ailleurs parce que la localisation des espaces mis en relation par un flux - et, par conséquent, les positions des OD qui caractérisent leur espacement relatif - n'intervient jamais dans le raisonnement cartographique que le graphe peut être vu comme une solution légitime pour visualiser des flux (Bahoken, 2014b). Cela légitime aussi le fait que la cartographie d'un flux ne mobilise que « la largeur » ( $F_{ij}$ ) du figuré et, en aucun cas, sa « longueur » ( $L_{ij}$ ).

C'est parce que cette hyp. n°1 est, somme toute, logique au sens mathématique et égale à la version officielle (Bertin, 1967 ; Tobler, 1987), que nous la qualifions de *logique de flux*.

**Définition de la logique de flux ( $F_{ij}$ ) :** « raisonnement conduisant à la réalisation d'une carte de flux à partir des valeurs quantitatives situées au cœur de la matrice. Sa représentation mobilise une implantation linéaire sous la forme d'un lien valué (linéaire ou courbe) dont la largeur est proportionnelle à la valeur du flux, en application de la Taille. La particularité de cette logique est de ne pas tenir compte de l'espace, à l'inverse de la logique de mouvement » (Bahoken, 2016 : 443).

Cette *logique de flux* induit une conséquence forte sur le plan sémiologique : elle justifie le recours unique à la v.v. Taille, dont elle est caractéristique, mais elle soulève d'autres problèmes, en particulier d'ordre sémiologique. A bien y regarder, l'hyp. n°1 ne correspond pas à l'application *stricto sensu* du principe de proportionnalité de cette v.v. Taille avec la « surface » ( $S$ ) du figuré, puisque seule sa « largeur » ( $F_{ij}$ ) est mobilisée. Autrement dit, le figuré qui illustre la valeur ( $F_{ij}$ ) ne correspond pas à son rapport de surface ( $S$ ) représenté par le produit (longueur\*largeur).

Ce problème d'ordre sémiologique pose l'hypothèse paradoxale d'un décalage entre l'information de flux disponible dans la matrice ( $F_{ij}$ ), celle qui est représentée sur une carte ( $F_{ij}$ ) et la perception d'une « surface visuelle » ( $S$ ) qui en ressort par le truchement de la v.v. Taille. La raison tient au fait que le raisonnement mené selon une *logique de flux* consiste à privilégier la représentation de ( $F_{ij}$ ) au détriment des positions géographiques des lieux ( $x, y$ ).

Pour remédier à cette utilisation apparemment erronée de la v.v. Taille, il convient de corriger la dimension de « largeur » de la bande, ce qui nous conduit à une seconde hypothèse.

## 2.1. L'hypothèse n°2 d'une perception des variations de la « surface visuelle » des figurés

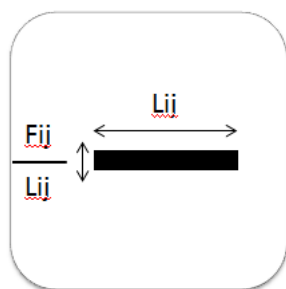
La mise en doute de l'hyp. n°1 tient à la variété des dimensions (carto)graphiques perçues du flux, alors que le cartographe ne mobilise que leur seule « largeur ». Elle nous conduit à soulever un problème plus général portant sur la signification de la quantité de noir représentée sur une carte de flux. La tâche correspondante définit une « surface visuelle » dont la perception semble primer sur celle de la « largeur » du figuré (voir fig. 3).

Cette « surface visuelle » serait-elle la dimension graphique qui, parce qu'elle est instantanément perçue comme telle, symboliserait le flux ?

Supposer l'hyp. 2 exacte signifierait que pour une carte de flux où la teinte et la v.v. Valeur des bandes seraient uniformes (i.e. 100% de noir comme sur la fig. 3, l'œil détecterait alors une *masse visuelle* égale non pas à la somme des valeurs de flux (à observer au droit de chaque lieu) mais plutôt à la somme des valeurs d'une autre quantité définie par cette « surface visuelle ». Cette autre quantité est, en fait, analogue à la mesure d'un débit. Elle possède en fait peu d'applications dans notre cadre d'analyse, car elle nécessite la prise en compte du temps ( $T_{ij}$ ), de données disponibles à plusieurs dates.

La mise en œuvre s'avère en outre compliquée, car elle conduit – temporairement, certes – à une impasse cartographique (fig 4). En effet, l'examen approfondi de cette hyp. 2 n'est pas aisé à ce stade. En effet, pour corriger ce décalage de perception, il convient d'affecter une « largeur » de figuré égale non pas à ( $F_{ij}$ ) comme dans l'hyp. 1 (fig. 3) mais égale à ( $F_{ij}/L_{ij}$ ), comme illustré théoriquement par la fig. 4... Mais cela n'est pas possible en pratique.

Figure 4. Illustration de l'hypothèse n°2



Cette hyp. 2 conduit à une impasse cartographique pour deux raisons principales : d'abord parce que le résultat de cette opération ( $F_{ij}/L_{ij}$ ) est une valeur décimale, une donnée de rapport et non plus un stock qu'il n'est plus possible de mobiliser avec la v.v. Taille pour agir sur « largeur » du figuré (il est certes possible de mobiliser la v.v. Valeur, nous y reviendrons ultérieurement). Ensuite, parce que la matrice ainsi générée  $I_{ij}=(F_{ij}/L_{ij})$ , dont on peut dire qu'elle décrit une forme d'intensité ( $I_{ij}$ ) des flux perd l'une de ses propriétés fondamentales : l'additivité en ligne et en colonnes. Malgré son intérêt théorique, nous ne développerons pas davantage ici cette hyp. 2, car la difficulté à laquelle elle conduit n'est pas résoluble à ce stade.

Nous poursuivons néanmoins la réflexion en revenant à l'hyp. n°1, tout en conservant les apports théoriques de cette hyp. 2. Ainsi, dans notre cadre d'analyse, nous considérons que la perception de cette « surface visuelle » correspond formellement à un mouvement ( $M_{ij}$ ) soit, dit autrement, à

la perception d'une « surface géométrique » issue du produit de la « largeur » (Fij) par la « longueur » (Lij) du figuré.

Nous en concluons que la *logique de flux* classique (Hyp. 1) intègre la perception de (Mij) dans la représentation de (Fij), au niveau cognitif et non dans sa construction puisque la distance est déjà donnée par le système de projection cartographique ; elle est aussi immédiatement perçue sous la forme de (Lij).

Pour examiner dans quelle mesure il serait possible de mobiliser (Lij), dans un contexte où l'espace joue un rôle, parce que nous considérons qu'il n'est pas plat, nous introduisons une *logique de mouvement* dans un espace géographique.

### 3. La construction d'une carte de flux selon une *logique de mouvement*

L'adoption d'une *logique de mouvement*, pour cartographier un flux, introduit l'espace dans le processus de construction cartographique et non seulement dans sa modélisation, comme variable spatiale. Elle nous amène à considérer la « longueur » comme dimension intrinsèque du figuré, en sus de sa *largeur*. Pour cela, il est nécessaire de modifier notre raisonnement, dans l'objectif est montrer que la longueur du figuré, notée (Lij), correspond peu ou prou à une acception de la notion de distance parcourue par le flux. Pour distinguer ce raisonnement du précédent, nous le qualifions de *logique de mouvement*, que nous définissons comme suit.

**Définition de la logique de mouvement :** « raisonnement privilégiant une vision relationnelle des flux, tenant compte de l'espace. Elle mobilise un trait sinueux, pour caractériser le cheminement de la quantité déplacée, de largeur proportionnelle (en application de la Taille) à la valeur du flux (Fij) » (Bahoken, 2016 : 443).

Nous mobilisons ainsi l'espace comme forme simplifiée de séparation spatiale, par le recours à la notion de distance parcourue. Cette notion est, par ailleurs, essentielle puisqu'elle fait référence à celle de *franchissement de limite de zone* qui intervient dans la mesure du flux. Nous considérons que (Lij) figure la distance parcourue par le flux (Dij), pour un système de projection cartographique donné. Cette distance, notée (Dij), est une généralisation de la distance effectivement parcourue dans la réalité, qui correspond au coût généralisé de déplacement (Eij), exprimée en distance-temps ou en coût de transport, par exemple. (Dij) est une distance géométrique que nous prenons géographique, en kilomètres mesurés sur un espace projeté, et que nous généralisons à la métrique à vol d'oiseau : à la distance euclidienne, également exprimée en kilomètres, notée (Dij).

De ce point de vue (Lij), qui décrit la longueur du trait (en kilomètres sur le terrain) représenté sur la carte, correspond à une *distance cartographique* (en millimètres sur la carte). Utilisée pour symboliser cette distance géographique (Dij) sur la carte de flux, elle est élaborée en analogie avec la notion de « *distance graphique* » que quelques auteurs (Tobler, 1969 ; Müller, 1979 ; L'Hostis, 2003) ont préalablement mobilisée dans le cadre d'analyse de flux affectés sur réseaux. C'est pourquoi la cartographie de (Lij), dans le contexte de la métrique euclidienne, est réalisée sous la forme d'un trait droit (pour figurer le flux OD dont il a été question dans la section 2.2.).

La réponse à la question de savoir pourquoi l'œil perçoit une « *surface visuelle* », figurée par une tâche correspondant à une quantité de teinte noire apparente (ici 100% de noir) dans l'hyp. 2, nous conduit à introduire le concept de « mouvement ». Cette hyp. 2 est bien plausible, même si sa mise en œuvre est intenable sans le concours de la v.v. Valeur. Ainsi, c'est le fait de considérer la perception de cette tâche noire, sur une carte de flux, qui nous conduit logiquement à la notion de « surface géométrique » (S). Cette surface géométrique résulte du produit de la largeur par la longueur du figuré. Dans notre cadre d'analyse, cette mesure qui mobilise la longueur (Lij) du







Figure 7. Illustration de l'hypothèse n°4



De plus, la distance parcourue considère déjà le temps de déplacement vu que, selon les cas, la carte représentera un nombre d'individus qui s'est déplacé sur une période ou bien un nombre d'individus.kilomètre qui s'est déplacé sur un espace géographique.

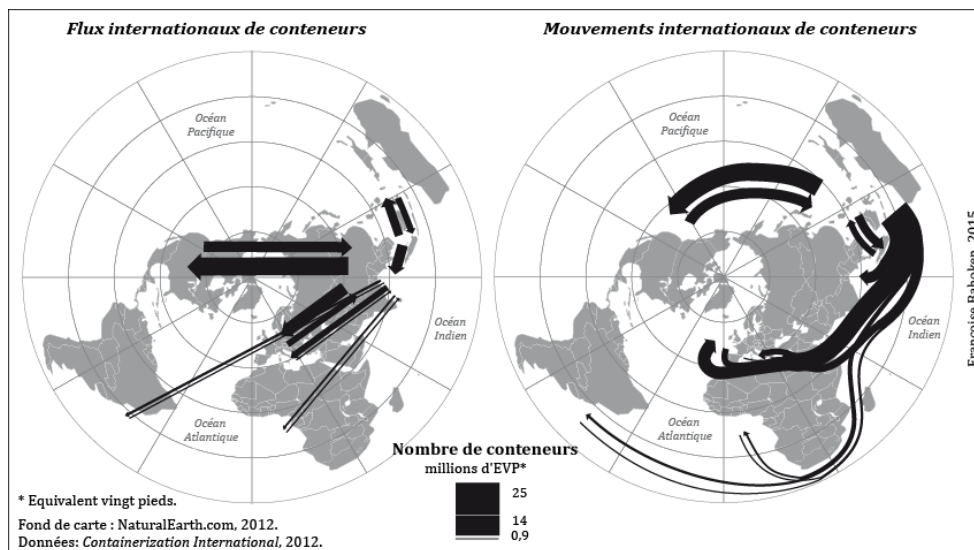
Cette 4<sup>e</sup> hyp. n'est, de fait, exacte que dans le cas où le flux est spatialisé. Elle justifie le recours à la carte pour représenter un mouvement dans l'espace. En effet, l'intérêt d'une *logique de mouvement* est d'inscrire la réflexion cartographique dans un territoire, à l'inverse de la *logique de flux* classique qui considère un plan quelconque. Elle justifie l'importance de la carte de flux, pour représenter des interactions spatiales, par rapport au graphe de flux ordinaire. Dans un graphe, les positions des lieux  $y$  sont sans rapport avec leur géographie, supposant en cela une hypothèse théorique forte de fin de la distance.

Puisqu'il n'est pas nécessaire d'introduire ( $D_{ij}$ ) dans la construction du figuré, alors les hyp. n°1 et n°4 sont identiques sur le plan de la construction cartographique : elles mobilisent, toutes deux, un figuré dont la seule dimension de « largeur » est proportionnelle à la valeur disponible dans la matrice (voir fig. 2, fig. 5, fig. 6 et fig. 7).

Sur la carte, la forme du tracé du flux ou du mouvement est toutefois susceptible de différer, d'une part, en fonction de l'échelle géographique d'observation de ces mobilités et, d'autre part, de l'acception de la distance parcourue. En effet, à l'échelle locale, la perception de ( $D_{ij}$ ) est à peu près égale à celle de ( $L_{ij}$ ). En revanche, cela n'est pas le cas à l'échelle mondiale, en raison du rôle justement joué par le système de projection cartographique pour la représentation des *flux spatialisés* ou des mouvements spatiaux, autrement dit des positions relatives des lieux les uns par rapport aux autres qui définissent leur espacement et, plus loin, la distance parcourue par le flux (ou le mouvement).

La fig. 8 illustre sur une sélection de flux, émis / reçus par l'Asie du sud-est, la discordance visuelle pouvant exister dans la perception des distances parcourues en fonction de la sémantique.

Figure 8. Discordance visuelle des distances cartographiques ( $L_{ij}$ ) et géographiques ( $D_{ij}$ ) à l'échelle mondiale



Pour que la perception du flux spatialisé et du mouvement soient égales, il faudrait alors que la représentation du flux suive un réseau de transport, une route réelle, faute de quoi ( $L_{ij}$ ) ne saurait restituer, à elle seule, la distance fonctionnelle :  $(F_{ij}) \approx (M_{ij})$ . Sur la fig. 8 (à droite), les flux commerciaux qui décrivent le transport de conteneurs par voie maritime sont tracés en suivant leur route réelle, apportant ainsi une solution cartographique dans le cadre de cette *logique de mouvement*.

L'introduction d'une *logique de mouvement* permet ainsi de réconcilier le tracé de ces flux mondiaux avec les territoires traversés, puisque l'on voit bien que la cartographie des routes empêche la représentation de flux impossibles dans la réalité (des flux par voie maritime qui franchissent des espaces continentaux).

## Conclusion

Cette réflexion sur les aspects sémiologiques de la signification de la carte de flux, au regard de sa construction, permet de démontrer d'une part, qu'il n'existe qu'une et seule méthode de cartographie de flux (hyp. 1) ou de mouvement (hyp. 4), qui consiste à agir sur la seule dimension de « largeur » du figuré, donc :  $(\text{hyp. 1}) = (\text{hyp. 4})$ . D'autre part, que sa mise en œuvre correspond à une approximation de la représentation du mouvement réalisé dans un espace géographique, car la distance cartographique, lorsqu'elle est approximée par la métrique euclidienne (tracé droit entre les OD), ne saurait correspondre avec exactitude à la distance fonctionnelle dont le tracé sur une carte nécessite de suivre la route réellement empruntée dans la réalité, pour relier l'origine à la destination.

Nous vérifions ainsi l'intuition commune selon laquelle une carte de flux correspond à peu près à une carte de mouvements ( $F_{ij}) \approx (M_{ij})$  et le caractère invariable, immuable, de leurs constructions cartographiques. Ce qui va donc distinguer une carte de flux d'une carte de mouvements, c'est d'abord leur sémantique à savoir l'interprétation que l'on réalise de la quantité en déplacement représentée sur une carte en termes de flux ou de mouvements. Par conséquent, ce n'est que dans un second temps que la question du choix des critères de sélection de l'information de flux à cartographier pourra être réalisée, dans le cadre d'une *logique de flux* ou d'une *logique de mouvements* estimés. Cette double possibilité ouvre par ailleurs la voie vers de nombreuses possibilités de

