POUR LE RENOUVELLEMENT DE LA SÉMIOLOGIE DE LA CARTE DE FLUX

par Françoise Bahoken

Université Paris-Est / Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux (IFSTTAR), AME-SPLOTT- Cité Descartes, 14-20 bd Newton, 77447 Marne-la-Vallée cedex 2
UMR 8504 Géographie-Cités / Paris

L'enseignement classique des méthodes de cartographie statistique des flux est entaché d'un verrou spécifique lié à la difficulté d'appréhension des données disponibles dans le tableau de départ, la matrice de flux origine-destination, et à leur représentation. Face à des difficultés méthodologiques de différentes natures, la carte de flux est, dès lors, toujours réalisée sur une partie des données disponibles. Elle est aussi souvent focalisée sur les lieux, en raison de difficultés spécifiques au maniement du figuré orienté, la flèche. L'objectif d'une carte de flux est pourtant de représenter (aussi) la partie de la matrice qui correspond à la quantité transférée entre les lieux, le flux et pas seulement son effet sur les lieux. Cela oblige à la résolution des problèmes rencontrés qui peut être réalisée à plusieurs moments du processus de cartographie. Nous proposons d'examiner des solutions qui sont d'ordre exclusivement sémiologique, qui autorisent la représentation de l'ensemble de l'information. Plutôt que de proposer un historique de la cartographie des flux, ou une critique des solutions existantes, nous proposons une nouvelle perspective d'analyse cartographique des matrices de flux. En nous appuyant sur les fondamentaux de l'enseignement classique de la sémiologie de la carte de flux (Bertin, 1967 ; Tobler, 1982, 1987), nous montrons l'intérêt du recours à des principes empiriques développés dans le champ de l'informatique graphique (Mac Eachren, 1995). Leur application opère un double bouleversement des codes esthétiques et sémiologiques de la figure, elle renforce aussi la perception des motifs généraux permettant le renouvellement de la sémiologie de la carte de flux.

Introduction

L'objectif de la cartographie d'une matrice de flux est de représenter sous une forme spatialisée, les valeurs de ses cellules qui sont renseignées, en particulier la partie de la matrice qui correspond au transfert dans l'espace des quantités dont il est question (des biens, des personnes, des euros, …). Le déplacement de ces quantités étant intervenu nécessairement dans un intervalle de temps, la carte de flux qui en résulte l'intègre souvent implicitement dans sa représentation. C'est pourquoi nous n'allons pas évoquer l'aspect temporel et focaliser notre attention sur la cartographie du déplacement dans l'espace.

La réalisation d'une carte de flux pose traditionnellement de nombreuses difficultés qui sont d'ordre théorique, méthodologique et pratique. Ces difficultés sont liées à la nécessité de résoudre différents effets graphiques concomitants qui se traduisent sur la carte par une complexité graphique d'autant plus importante que la matrice est dense, c'est **l'effet spaghetti** ainsi qualifié par Breukelman et al. (2005). **L'effet spaghetti** se manifeste de différentes manières : il correspond, en particulier, au chevauchement des liens préjudiciable à la perception des différents motifs des flux (*patterns*) et/ou au degré de couverture spatiale qui rend une partie des figurés représentés illisible. Combiné à un effet de taille des lieux, il empêche l'illustration aisée de la convergence des flux vers les lieux les plus attractifs. Étant donné que la résolution de ces principaux problèmes peut être effectuée à plusieurs moments du processus de cartographie : depuis le traitement des données, leur transformation ou leur décomposition, leur modélisation, leur sélection jusqu'à leur représentation graphique, nous proposons d'examiner des solutions qui sont d'ordre exclusivement sémiologique. Ces solutions peuvent être mises en œuvre facilement, dans le cadre d'un enseignement théorique et méthodologique sur les méthodes de cartographie statistique des flux, à l'aide d'outils qui sont libres de droits tels que QuantumGis, ou encore la série d'applications de géovisualisation développées par I. Boyandin.

L'objectif que nous fixons est de représenter l'ensemble de l'information disponible dans une matrice de flux et cela, sans opérer de sélection ni de réduction *a priori* des données, comme cela se fait couramment. L'approche proposée s'inscrit dans le cadre d'une « **cartographie directe** » (Pumain, Saint-Julien, 2001) des flux, car elle n'agit pas sur les aspects liés au traitement des données statistiques ou cartographiques que nous supposons avoir été réalisé en amont. Elle renvoie aussi à la question de la perception sensible des motifs des flux, au caractère esthétique de la figure que nous mobilisons à travers l'utilisation de la couleur, en tant que teinte dans un espace colorimétrique et comme variable visuelle, lorsqu'elle est associée à la **valeur**. Pour cela, nous faisons l'hypothèse générale que certains principes empiriques mis en œuvre dans le champ de l'informatique graphique, pour la visualisation de masses de données relationnelles sur un support écran,

peuvent être transférés à la cartographie statistique de flux, permettant le renouvellement de sa sémiologie graphique, de son esthétique.

Pour illustrer la manière dont nous validons cette hypothèse de manière didactique, nous avons recours à une petite matrice fictive (Fij) composée de quatre lieux, que nous avons décomposée en assumant la position de W. Tobler (1979, 1982) en deux parties complémentaires : l'une décrivant la partie symétrique des échanges (Fij+) et l'autre, la partie antisymétrique (Fij-). L'idée est d'examiner les variations de la cartographie de ces trois matrices, liées à l'application des solutions sémiologiques proposées. La démonstration est illustrée par leur représentation simplifiée sous la forme d'une carte, dans un espace millimétrique. Nous présentons, dans un premier temps, les données disponibles dans ces trois matrices, telles qu'elles ont été observées. Le rappel des principes classiques de sémiologie graphique des flux appliqués à ces trois matrices nous conduit, dans un troisième temps à modifier l'utilisation courante de la teinte et du figuré usuel de la flèche. Cela ouvre la voie, dans la dernière section, au renouvellement de la figure des flux que nous présentons, en agissant sur les propriétés de la seule variable visuelle **couleur**.

Présentation de l'objet d'étude

Nous considérons le cas général de disponibilité de données géo-localisées archivées dans une matrice de flux (Fij), définie de la manière suivante par :

- Des couples de lieux (i,j) où (i) est décrit l'identifiant du lieu d'origine et (j) celui de destination. (i) et (j) correspondent aux mêmes lieux : ils peuvent être alternativement des lieux d'origine ou de destination. La matrice est carrée, ce qui signifie qu'elle contient le même nombre (N) de lieux d'origine, portés en lignes, et de destination portés en colonnes.
- (Fij) décrit le flux observé entre (i) vers (j). Sa transposée (Fji) correspond au flux observé entre (j) et (i). Les flux intéressant un même lieu d'origine et de destination, qui correspondent à ceux qui s'expriment à l'intérieur des limites de zone et sans qu'il y ait franchissement de celle-ci, ne sont pas décrits. La diagonale de la matrice n'est, par conséquent, pas définie : (Fii= ϕ).

Cette matrice est valuée : la valeur (Fij) portée au croisement d'une ligne (i) et d'une colonne (j), correspond à une quantité mesurable : il s'agit d'une variable quantitative, discrète ou continue, qui s'exprime dans l'intervalle [0 ; +∞].

La figure 1 décrit la matrice de flux fictive que nous prenons pour exemple. Celle-ci est carrée, de rang 4. Elle est complète, ce qui signifie que toutes ses cases sont renseignées : N(N-1)=12 valeurs qui sont disponibles pour l'analyse. Cette matrice est aussi asymétrique : si (i) ≠ (j), alors (Fij) n'est pas nécessairement différent de (Fji). Dans l'exemple de la figure 1, la valeur (B, D)=(D,B)=2. Elle est volontairement simplifiée pour pouvoir être présentée facilement, dans le cadre d'un enseignement.

À partir de la matrice de la figure 1, plusieurs possibilités de cartographie sont envisageables, en fonction du raisonnement qui est mené et de l'objectif de la figure. Nous restreignons notre propos à l'approche qui conduit à réaliser une cartographie descriptive de la matrice, ce qui nécessite que les données (Fij) soient préalablement transformées en indicateurs, ou bien simplifiées dans le cadre d'une procédure de réduction ou décomposition de la matrice, tout dépend du choix de l'auteur. Sur le plan cartographique, nous suggérons la représentation d'une forme décomposée de la matrice, plutôt que des valeurs de flux initiales.

L'opération qui consiste à décomposer les valeurs de flux observées a d'abord pour objectif de décrire les données, en même temps qu'elle permet de les rendre comparables à d'autres. La formulation des différentes méthodes pouvant être variable en fonction des auteurs, nous considérons que les discussions liées à leur choix et à leur élaboration ont été réalisées en amont. C'est pourquoi nous assumons d'emblée l'idée de W. Tobler (1979, 1982) de décomposer la matrice de flux (Fij) en deux composantes élémentaires et complémentaires : l'une symétrique (Fij+) et l'autre antisymétrique (Fij), avec (Fij) = (Fij+)+(Fij-). Ces deux composantes autorisent, d'après l'auteur, les cartographies respectives du « **fond vital des échanges** » et de la « **dynamique du système d'échanges** » de la matrice (Fij).

La figure 2 présente la procédure de décomposition de la matrice de flux initiale.

Nous généralisons ces résultats en qualifiant les matrices de flux disponibles de la manière suivante : (Fij) correspond aux flux initiaux (aux données observées), (Fij+) décrit le volume de flux bilatéral et (Fij-) correspond au transfert de flux net. Les termes (Oi) et (Dj) correspondent aux marges de la matrice, respectivement aux sommes en ligne et en colonnes qui sont mobilisées pour cartographier l'effet des flux sur la distribution des lieux d'origine (Oi) et/ou de destination (Dj). Les méthodes de cartographie statistique des données scalaires (choroplèthe) étant bien connues, nous n'allons pas développer la représentation des (Oi, Dj), pour focaliser notre attention sur les données vectorielles (Fij).

La posture de W. Tobler nous place devant quatre matrices principales qui sont issues de la matrice de

avec :
i : lieux d'origine
j : lieux de destination
A : identifiants des lieux
8 : valeur du flux (Fij) de (A,B)

Fij	A	B	C	D
A	-	8	5	1
B	6	-	3	2
C	10	4	-	1
D	1	2	3	-

Figure 1 : Une matrice de flux carrée et asymétrique

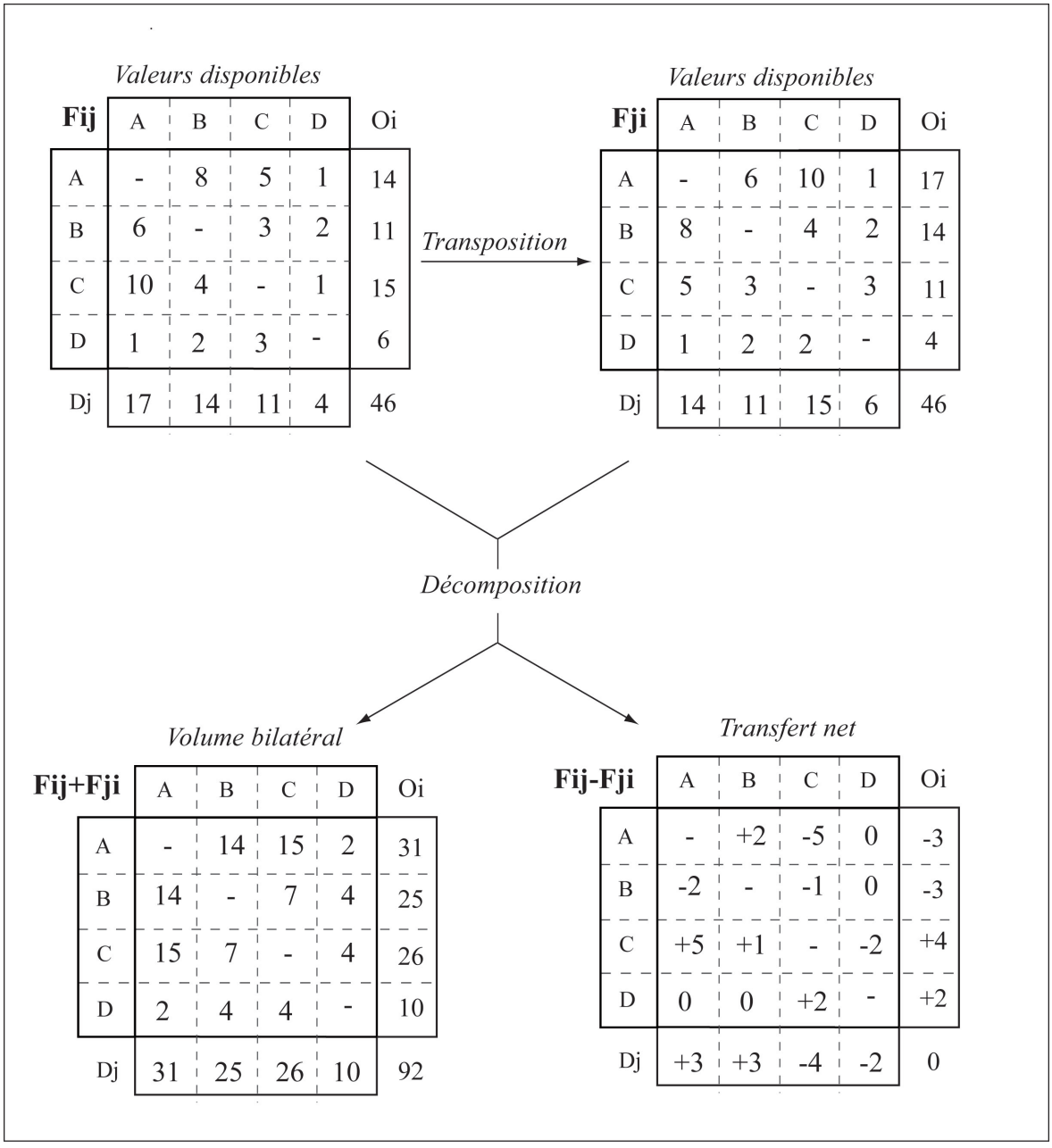


Figure 2 : Les quatre matrices principales issues de la matrice (Fij) de départ

départ (Fij). Nous pouvons introduire une possibilité supplémentaire qui correspond à la représentation de l'asymétrie des flux, définie comme le rapport de (Fij-) sur (Fij+), mais elle ne sera pas envisagée ici. Aussi, il est possible d'aller plus loin, en adoptant d'autres raisonnements qui conduisent à la création de nouvelles matrices, en appliquant par exemple un raisonnement logique (Bahoken, 2012, 2014), ou bien en intégrant la dimension spatiale. Sans entrer dans les détails de cette seconde proposition qui fait l'objet d'un autre développement, nous suggérons de pondérer la valeur de ces différentes matrices, par une acceptation de la distance (Dij) parcourue par le flux. Cela signifie qu'il est possible de considérer, pour chacune de ces matrices, d'autres possibilités de cartographie qui diffèrent en fonction de la manière dont la distance est prise en compte dans le calcul, la représentation et la perception des valeurs de la matrice.

Face à notre objet d'étude, une matrice (Fij) décomposée, l'objectif est maintenant de représenter les valeurs de flux (vectorielles) disponibles dans les différentes matrices de la figure 2. Quatre familles de méthodes de cartographie de flux peuvent être mises en œuvre. La première famille concerne les matrices asymétriques (Fij) qui décrivent le transfert d'une quantité positive entre deux lieux. La seconde famille est celle des matrices symétriques, positives ou négatives, c'est-à-dire identiques de part et d'autre de la diagonale principale : elle peut être illustrée par la cartographie du volume bilatéral de flux (Fij+). La troisième famille de méthodes concerne les matrices antisymétriques, dont les valeurs situées de part et d'autre de la diagonale principale sont identiques mais opposées, elles sont respectivement positives ou négatives. Cette troisième famille peut être illustrée par la représentation du transfert net (Fij-). La quatrième famille de méthodes concerne la cartographie de combinaisons complexes de matrices issues de (Fij+) et (Fij-), elles ne sont pas présentées ici. Si ces familles correspondent à des matrices qu'il est toujours possible de représenter sur une carte de flux, celle-ci diffère par les éléments de sémiologie graphique qui sont mobilisés, que ce soit au niveau du choix du procédé graphique, de celui des variables visuelles ou de critères purement esthétiques, en fonction de l'objectif de la carte. Nous présentons dans la section suivante, les aspects classiques de la sémiologie graphique des cartes de flux issue des trois premières familles.

Aspects sémiologiques de la carte de flux classique

La cartographie des données disponibles dans n'importe laquelle des matrices de flux présentées sur la figure 2 nécessite de placer sur une carte 6 figurés qui correspondent à la représentation des flux observés entre les lieux et 4 autres pour leur effet sur la distribution des lieux. La diagonale de la matrice n'étant pas renseignée, il n'est pas question de la représenter.

Pour cartographier ces données du point de vue des liens, nous faisons le choix d'utiliser un trait droit, un lien direct pour illustrer le flux reliant une origine à une destination. Le cheminement exact du flux entre les deux lieux n'étant pas connu, ce trait n'a pas besoin d'être incurvé : nous ne lui appliquons aucune transformation d'ordre graphique ou même cartographique. Ce trait sera, en revanche, éventuellement assorti d'un sens lorsque le flux est orienté, en fonction de la polarité de la valeur de flux de la matrice correspondante. Autrement dit, lorsqu'il est nécessaire de représenter le sens du flux, une pointe sera apposée au trait, figurant ainsi une flèche (ou tout autre procédé permettant de représenter une direction). Pour représenter les flux observés du point de vue des lieux, nous faisons le choix du point.

Les données de flux observées au niveau des liens (Lij) et des N lieux étant de nature quantitative, les principes classiques de sémiologie graphique (Bertin, 1967) imposent le recours *a minima* à la variable visuelle **taille**. De ce fait, l'ensemble des figurés qui illustrent les flux nécessite d'être proportionnel à la valeur représentée. Les choix graphiques et d'ordre sémiologique, qu'ils soient imposés ou pas, sont nécessairement contraints par la composante spatiale caractéristique de la carte. La figure 3 illustre la méthode de cartographie classique des valeurs de la matrice de flux (Fij).

Sur la figure 3, la flèche indique le sens du transfert de la quantité positive : sa **largeur** correspond à la valeur de (Fij) et sa **longueur** à la distance euclidienne qui sépare (i) de (j). Le point illustre notre choix de représenter le volume de flux observé du point de vue des lieux (dont le calcul est présenté sur la fig. 2). Le procédé de la flèche est requis pour la cartographie de la matrice (Fij), car elle est asymétrique : l'information transférée de (i) vers (j) diffère parfois de celle de (j) vers (i). Dans le cas contraire des matrices symétriques où la valeur transférée est identique, quel que soit le sens du flux, c'est le procédé de la bande qui convient à la cartographie. La figure 4 illustre la cartographie des matrices symétriques positives, en prenant l'exemple du volume bilatéral de flux (Fij+).

La figure 4 présente une carte de flux de type **volume-volume** où la même information, le volume, est représentée au niveau des liens (volume bilatéral) et des lieux (volume aux lieux). Il ne s'agit pas là d'une redondance, mais plutôt de donner à voir la même information sous deux formes complémentaires : la taille des points correspond à la somme équivalente

des largeurs des liens placés au droit des lieux. Ces liens prennent la forme de bandes, dont la surface est mesurable (où la largeur est proportionnelle à la valeur du flux).

Il convient de noter que la représentation du volume bilatéral n'est pas orientée puisque l'information représentée correspond à une quantité identique échangée entre deux lieux. Ainsi, ce que l'observateur est censé percevoir instantanément, c'est une variation de la taille des largeurs de bandes qui correspond aux différentes valeurs de flux, pas celle de leur longueur qui correspond à la distance parcourue, ou encore de leur surface. L'application de la **taille**, en cartographie de flux, correspond à une variation de la largeur des bandes, vu que la mise en œuvre de leur surface (issue du produit largeur*longueur), proportionnellement à leur valeur, est intenable en raison de la contrainte spatiale de position des lieux. Sur les figures 3 et 4, quatre composantes de sémiologie sont mobilisées : la localisation des (couples de) lieux, le point, la flèche ou la bande rectilinéaire, la **taille** et la **couleur**. Les figurés sont réalisés en noir, ils sont placés sur un fond blanc ce qui correspond à un style qualifié de noir-et-blanc, mais il aurait pu en être autrement.

Le choix de la couleur

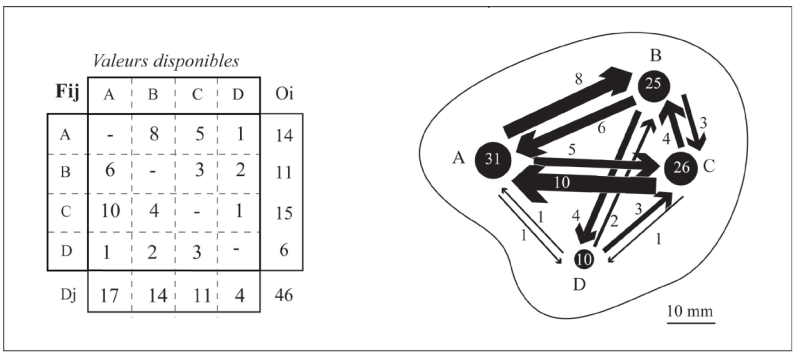
Sur le plan sémiologique, la cartographie du volume bilatéral fait appel à une série statistique composée de valeurs discrètes qui sont symétriquement positives, comme illustré par la figure 4. Elle ne nécessite donc pas l'utilisation d'une couleur particulière, au sens de teinte. C'est d'ailleurs la raison pour laquelle la figure 4 est réalisée en noir et blanc. Elle ne nécessite pas plus l'utilisation de la variable visuelle couleur, celle-ci étant traditionnellement réservée à la représentation de variables continues discrétisées en k plages de valeurs, souvent assorties à la valeur. Nous en concluons que le recours à la couleur est inutile, dans le cas spécifique de la cartographie du volume bilatéral. La figure 4, réalisée en noir et blanc, présente l'aspect classique des figures anciennes réalisées à main levée. Son efficacité visuelle réside dans l'équilibre des deux teintes, dans leur contraste. Si le noir est réservé aux figurés, il est aussi associé au blanc, sa teinte opposée, dans l'objectif de renforcer la propriété de séparation de la couleur. Ce choix du noir et blanc est purement subjectif puisque la même carte, réalisée avec d'autres teintes opposées au blanc, est tout aussi lisible, comme illustré par la figure 5. Nous en concluons que le choix subjectif de la teinte, pour réaliser une carte du volume de flux, est un critère négligeable, au regard de l'importance de la taille. Autrement dit, il est plus utile de s'attacher à appliquer correctement la taille plutôt que choisir une teinte, l'efficacité de la carte étant apportée par la variation de taille des figurés. Nous validons ici l'un des résultats de l'enquête réalisée par L. Jégou (2013) selon lequel le choix de la teinte qui conditionne « […] l'aspect agréable de la carte ne participe pas à son efficacité perçue » (Jégou, 2013 : 41). En effet, pour reprendre une expression de C. Zanin, ce qui « saute aux yeux », dans une carte classique du volume de flux, c'est bien la perception des différences plus ou moins importantes de la taille des cercles et des bandes, c'est-à-dire un critère d'ordre méthodologique lié à la sémiologie des flux plutôt qu'à leur esthétique.

Le fait de considérer que l'utilisation de la couleur n'apporte pas d'information particulière à la perception des motifs d'une carte du volume de flux nous conduit à proposer une figure réalisée dans un style noir et blanc. Le noir et le blanc étant deux teintes opposées et complémentaires, il est possible d'intervertir leurs positions, de substituer l'une à l'autre sans nuire à la transmission du message. Seule l'esthétique de la figure est modifiée puisqu'elle passe du noir et blanc des figurés noirs sur un fond blanc, au blanc et noir des figurés blancs sur un fond noir. La figure 6 compare la figure classique du volume de flux (à gauche) à son négatif (à droite), représenté en blanc-et-noir, avec une palette en niveaux de gris.

Cette figure 6 correspond à un premier bouleversement de la figure classique du volume de flux qui résulte de l'inversion de la teinte du fond de la carte, par conséquent, de celle des figurés. Elle conduit à faire le choix d'une teinte sombre pour le fond de la carte et d'une teinte claire, voire blanche pour les figurés. L'intérêt de ce choix est double : il permet d'une part, de laisser les figurés en blanc, de les réserver à l'utilisation d'autres variables visuelles telles que la valeur, par exemple, ou encore la transparence (Mac Eachren, 1995) sur laquelle nous reviendrons dans la section 4 ; de l'autre, d'améliorer la perception des motifs d'une figure dont on sait, par l'expérience, que les figurés étant nombreux, les contrastes sont mieux perçus lorsque le fond est noir. Le cas d'utilisation du procédé de la bande, blanche (ou noire), convient bien à la représentation des matrices symétriques positives illustrées par le volume (Fij+). Il ne s'applique pas à celles qui ne le sont pas, en raison de l'importance du sens du transfert. Dans ce cas, il est nécessaire d'examiner la sémiologie du bilan des échanges, qui correspond au (Fij-).

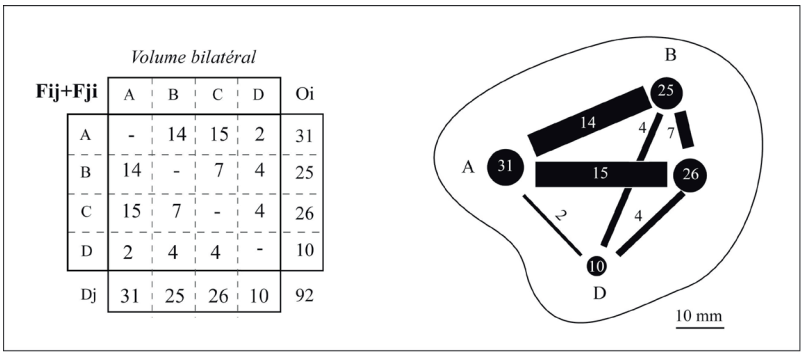
Le choix du figuré

En présence d'une matrice antisymétrique où, pour tout (i)≠(j), (Fij) et (Fji) décrivent des valeurs identiques qui présentent un signe opposé, de part et d'autre de la diagonale principale, il est préférable de cartographier le transfert des flux net illustré par la matrice (Fij-). Du point de vue des lieux (i), cette différence entre



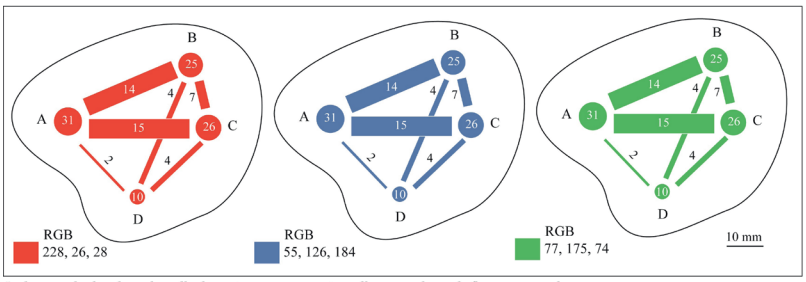
La largeur des bandes et la surface des points sont proportionnelles aux valeurs de flux correspondantes.

Figure 3 : La sémiologie classique de la carte de flux (Fij)



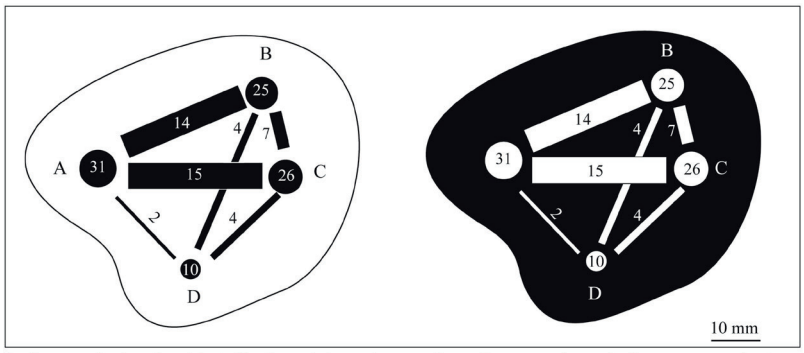
La largeur des bandes et la surface des points sont proportionnelles aux valeurs de flux correspondantes.

Figure 4 : La sémiologie classique de la carte du volume de flux (Fij+)



La largeur des bandes et la taille des points sont proportionnelles aux valeurs de flux correspondantes.

Figure 5 : Illustration du caractère facultatif de la teinte



La largeur des bandes et la taille des points sont proportionnelles aux valeurs de flux correspondantes.

Figure 6 : Vers une nouvelle esthétique de la carte de flux

les valeurs de flux entrantes et sortantes correspond à la variation de leur population, tandis que du point de vue des liens (Fij), elle décrit le transfert net dont il faut représenter le sens, par une flèche – ou tout autre figuré orienté –, pour distinguer les lieux qui perdent de ceux qui gagnent. Sur le plan sémiologique, la cartographie du transfert net diffère fondamentalement de celle du volume bilatéral. En effet, pour tout (i) ≠ (j), (Fij) n'est pas différent de (Fji-) mais son exact opposé : (Fij-)= -(Fij-), sa matrice transposée, tandis que dans la matrice (Fij+), pour tout (i) ≠ (j), (Fij) est égal à (Fji).

Ce caractère antisymétrique de la matrice (Fij) nécessite de prendre en compte le sens du flux dans sa cartographie, en utilisant une flèche, comme dans le cas de la représentation de la matrice (Fij), illustré par la figure 3. Cependant, à la différence de cette matrice (Fij) où les valeurs (Fij) et (Fji) qu'elle contient renseignent sur des informations différentes (Fij) ≠ (Fji), les valeurs de la matrice (Fij-) présentent la même information de part et d'autre de la diagonale principale mais opposée, sauf lorsqu'elle est nulle (Fij=0), que le bilan est équilibré. Plusieurs possibilités sont dès lors envisageables pour cartographier le transfert net (Fij-). La première d'entre elles consiste à représenter l'ensemble des valeurs de la matrice sur la même carte, à l'instar de la cartographie de la matrice (Fij). Elle est illustrée par la figure 7, selon la même esthétique du blanc et noir.

La représentation sur la même carte de valeurs de flux identiques, mais symétriquement négatives et positives entraîne, en premier lieu, une confusion dans la caractérisation des lieux émetteurs et récepteurs. Le solde des flux aux lieux ne peut être représenté, car les valeurs de (Oi) et de (Dj) s'annulent. On observe en second lieu, une démultiplication du nombre de figurés qui présentent des orientations opposées, pour des tailles identiques puisqu'il s'agit de la représentation de la même information. En effet, lorsque (Fij-) vaut 2, cela signifie que (j) a reçu 2 éléments de (i), soit (+2) qu'il n'en a donnés [(Fij-)=2] ; ou bien que (i) a donné 2 éléments à (j) soit (-2) qu'il n'en a reçus [(Fji-)=-2]. De ce point de vue, la figure 7 réalisée sur l'ensemble des valeurs de la matrice (Fij-) représente à la fois les gains et les pertes, respectivement les créances et les dettes si l'on file la métaphore financière. Pour pallier cet écueil lié à la prise en compte du caractère antisymétrique des flux, qui conduit à représenter sur la même carte les créances et les dettes, une variante efficace de la solution classique consiste à simplifier la figure, en réalisant une carte pour chacune des situations, en éludant les valeurs nulles (Fij-=0). La figure 8 illustre la représentation distincte des valeurs strictement positives (les créances) ou négatives (les dettes) de la matrice (Fij-) . Il convient de noter que cette méthode permet aussi d'introduire la représentation du transfert net observé au niveau des lieux.

Les cartes de transfert net positif et négatif non symétrisées présentent la particularité d'être identiques, à la différence près du sens des flèches. Le choix de l'une ou de l'autre carte dépend souvent de la problématique sous-jacente, du besoin d'analyser les créances ou bien les dettes, ce qui revient en pratique à ne réaliser qu'une seule des deux cartes de la figure 8, à ne représenter qu'une partie de l'information disponible. W. Tobler a proposé de représenter le transfert net sur une seule carte, en recourant à la matrice des valeurs absolues |(Fij-)|. Cependant, celle-ci pose un problème particulier *a priori* insolvable à ce stade de l'analyse : celui de la représentation du sens du transfert net, autrement dit du flux gagnant (ou perdant). C'est pourquoi nous ne poursuivons pas l'examen de cette proposition.

Une manière de résoudre le problème de la représentation du transfert net, qui est celui de la duplication des cartes, consiste à traiter les données numériques au préalable de leur représentation, en les transformant, par exemple, en indicateurs « […] ou en ajustant le tableau d'échanges par un modèle gravitaire pour faire apparaître par différence des flux préférentiels ou des effets de barrière » (Beguin, Pumain, 1994 : 118). Ces derniers correspondent à des résidus qui sont respectivement positifs et négatifs, pouvant alors être représentés en utilisant la méthode (Fij). Pour notre part, nous proposons d'agir au niveau sémiologique, sur les critères qui définissent la teinte des figurés, tels qu'ils sont mobilisés en informatique graphique.

Le renouvellement de la sémiologie des flux

D'après le synopsis des variables visuelles formalisées par J. Bertin (1967), la couleur est une variable de séparation de l'image tout comme la taille. Son utilisation n'introduit toutefois pas de modification morphologique de l'objet sur lequel elle s'applique, à l'instar de la taille. La couleur ayant une propriété associative, elle permet d'introduire une séparation, c'est-à-dire une distance visuelle entre les différents objets colorés, sans en modifier la forme comme le fait la taille.

L'objectif d'une carte de flux étant aussi d'autoriser la perception de la masse de petits figurés, – de petits flux qui correspondent à des valeurs de flux faibles, mais qui se produisent à longue distance et qui, en étant les plus nombreux, concernent alors une population plus importante – il est envisageable d'agir sur les propriétés de séparation de la couleur. Pour y parvenir, nous faisons l'hypothèse que les principes empiriques mis en œuvre dans le champ de l'informatique graphique, pour visualiser les masses de données relationnelles, sont susceptibles d'enrichir et, plus loin, de renouveler

la sémiologie de la carte de flux. Plusieurs auteurs ont, en effet, proposé des extensions des principes de sémiologie graphique classiques de J. Bertin (1967), qui permettent de renforcer la perception des motifs de la carte, en lien avec les nouvelles possibilités de visualisation offertes par le support-écran. Pour ce qui est de la carte de flux, nous présentons deux possibilités d'action qui sont fructueuses. La première consiste à appliquer la variable visuelle transparence suggérée par A. Mac Eachren (1995), la seconde vise à transférer à la cartographie de flux, la sémantique de l'opposition colorée telle qu'elle est mise en œuvre en cartographie statistique, pour la représentation de stocks.

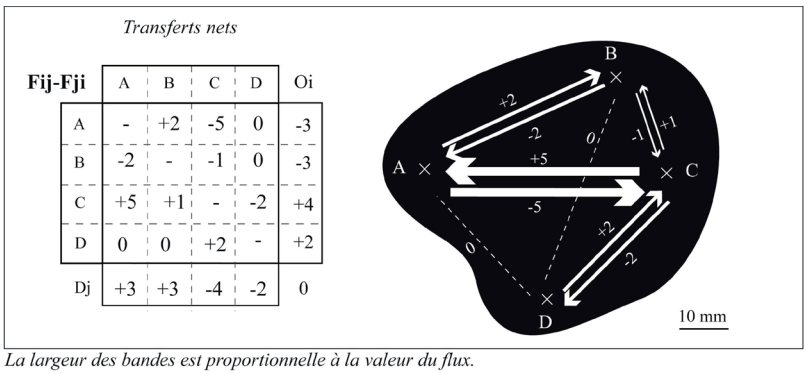
Le canal alpha de la transparence

Une manière intéressante d'améliorer sensiblement la visualisation graphique des figurés réalisés sur un support écran consiste à agir sur leur teinte. Pour le mode (R, G, B) par exemple, cela consiste à associer le canal alpha (R, G, B, A) à la nuance de couleurs, de manière à ajouter un effet de **transparence** ou d'opacité dans le rendu de la teinte. Le canal alpha conduit, en effet, à une égalisation des critères de la teinte qui modifie l'apparence visuelle des objets sur lesquels il s'applique. Son utilisation est très intéressante lorsque la figure est rendue complexe, par des objets dont les valeurs – les nuances de teintes correspondantes – sont combinées (elles correspondent à deux séries de valeurs, par exemple) ou bien parce qu'ils sont superposés, ou qu'ils se chevauchent comme dans le cas des flux. La méthode consiste donc à ajouter une nouvelle propriété de nature morphologique à la **couleur**, qui facilite la perception de ces motifs complexes. Ces motifs complexes correspondent, dans notre cas, à la masse de figurés linéaires qui se chevauchent de manière importante dans la cartographie d'une matrice de flux dense. L'utilisation du canal alpha conduit à la réalisation de cartes typiques, connues sous le terme anglais de *Value By Alpha (VBA) map*, une expression introduite par A. Mac Eachren (1995) pour désigner la variable visuelle **transparence**. Il s'agit d'une méthode informatique de *design* de la teinte formalisée en 2010 par R. E. Roth et al. (2010), en analogie avec l'utilisation de la **taille**, lorsqu'elle est mise en œuvre dans le cadre d'une anamorphose. La VBA est une analogie à l'expression *Value By Area (VBA) map*, spécifique aux procédés d'anamorphoses scalaires qui déforment la morphologie des unités spatiales proportionnellement à la valeur d'un indicateur statistique. Ici, c'est plutôt la « morphologie » de l'arrangement des canaux (R, G, B) qui définit la teinte perçue qui est « déformée », par rapport à la valeur d'un indicateur. Le procédé conduit à un ré-échantillonnage des niveaux de teinte ce qui produit, au final, un double échantillonnage des mêmes données : au niveau de la valeur et au niveau de la teinte, pour un effet visuel saisissant.

L'intérêt de l'utilisation du canal alpha est son applicabilité à chacune des unités spatiales qui caractérisent la zone d'étude, de la même façon que la **taille** pour l'anamorphose. Une grande valeur alpha signifie que la teinte de l'objet est opaque, ou faiblement transparente et inversement. D'après les auteurs, le canal alpha de la teinte résout le dilemme de l'anamorphose (qui déforme la topologie et la morphologie des unités spatiales tout en autorisant une perception plus juste des motifs spatiaux), en égalisant parfaitement les teintes en fonction de l'objectif de la carte. Il est notamment possible d'agir sur la figure, en illuminant les unités spatiales qui présentent les valeurs les plus significatives (ou inversement), ce que les auteurs qualifient « d'effet de projecteur », ou d'ajuster la **transparence** de manière à mettre en évidence un **effet de profondeur**. C'est cette dernière possibilité qui nous intéresse.

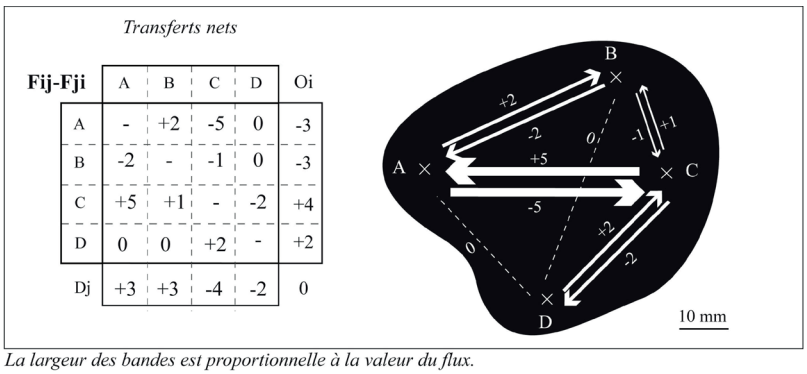
L'application de la **transparence** conduit, en effet, à la déformation de la teinte, de sa perception de manière à faire apparaître comme des gradients qui correspondent aux besoins de représentation de données incertaines (Mac Eachren, 1992) ou superposées. D'abord mise en œuvre pour rehausser les cartes choroplèthes, la méthode est ensuite utilisée sur des cartes de visualisation des réseaux sociaux, caractérisées par un chevauchement important de figurés linéaires. C'est pourquoi nous posons l'hypothèse que cette utilisation de la **transparence** de la teinte est susceptible d'améliorer le rendu des cartes de flux, tant sur le plan esthétique qu'au niveau de la perception des motifs.

L'action sur la **transparence** conduit à un ré-échantillonnage visuel qui se traduit, sur la figure, par la mise en évidence d'un **effet de profondeur** des figurés. Elle suggère, de notre point de vue, l'existence d'une composante d'échelle dans l'intensité des flux et l'intérêt de son utilisation dans le contexte spécifique de la cartographie de flux est avéré. Il réside dans l'amélioration de la saillance des figurés, ainsi que dans la perception de la masse de petits flux diffus qui présentent de faibles valeurs et qui ne seraient pas perceptibles autrement que par l'application d'une procédure de sélection des valeurs et/ou des figurés qui représentent les flux. Pour renforcer la perception des différentes catégories visuelles de liens, qui se distinguent, par leur taille ou par leur longueur, W. Tobler (1987) a suggéré de disposer les figurés qui présentent les valeurs les plus importantes au premier plan de la figure. L'auteur a également proposé de détourer les liens, avec un liseré clair (Tobler, 1987 : 159) à la manière des symboles proportionnels d'une carte choroplèthe, mais cette proposition ne nous est pas apparue efficace, car elle engendre un effet de surcharge graphique supplémentaire.



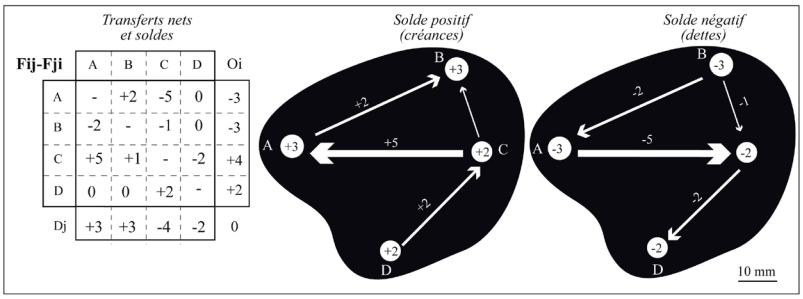
La largeur des bandes est proportionnelle à la valeur du flux.

Figure 7 : La sémiologie classique de la carte du bilan net (Fij-)



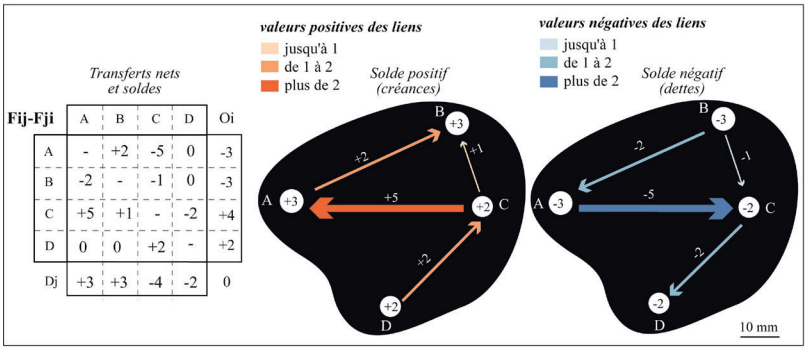
La largeur des bandes est proportionnelle à la valeur du flux.

Figure 7 : La sémiologie classique de la carte du bilan net (Fij-)



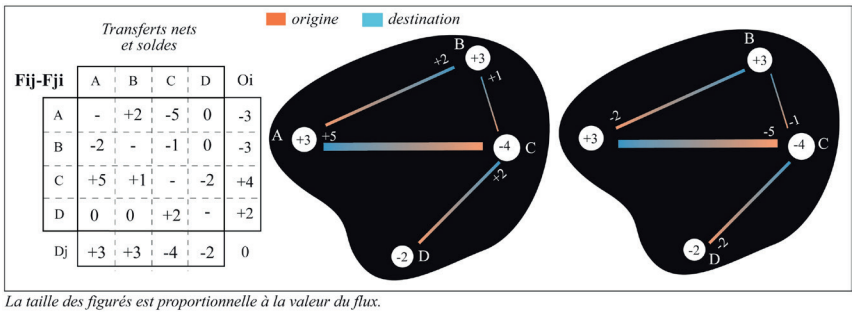
La taille des figurés est proportionnelle à la valeur du flux.

Figure 8 : La sémiologie classique de la carte du bilan net (Fij-) (variante)



La taille des figurés est proportionnelle à la valeur du flux.

Figure 9 : Le principe de l'utilisation classique des nuances de teinte opposées



La taille des figurés est proportionnelle à la valeur du flux.

Figure 10 : Le renouvellement de la sémiologie classique du bilan net (Fij-)

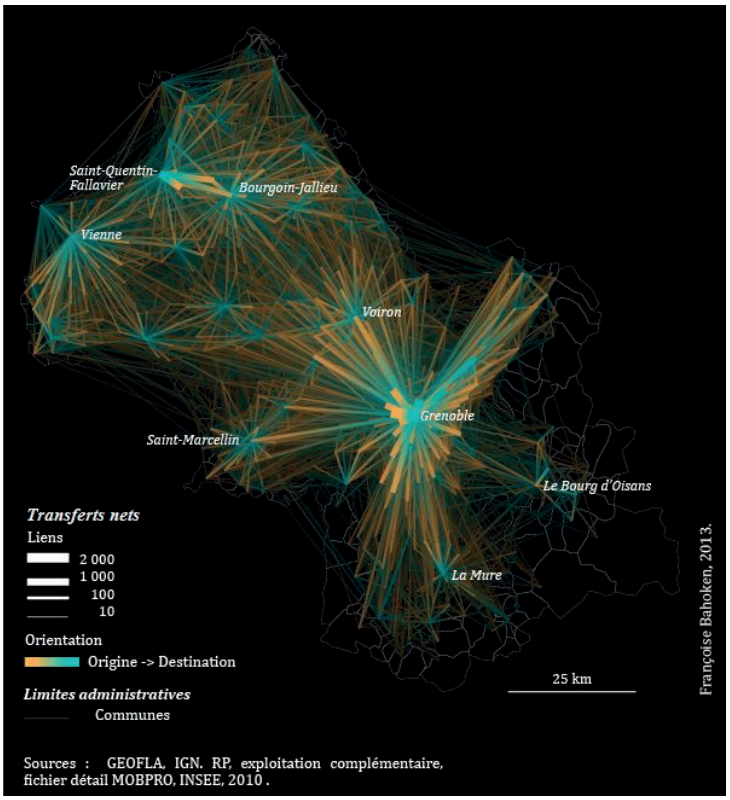


Figure 11 : Application à la cartographie de flux domicile-travail de l'Isère

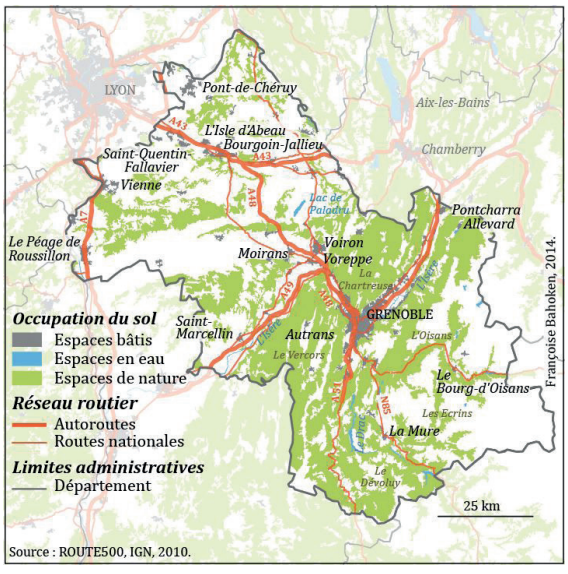


Figure 12. Topographie simplifiée du département de l'Isère (38)

La gestion simultanée de la disposition des liens, combinée à la transparence, augmente considérablement la séparation visuelle des figurés qui illustrent les flux et ce, d'autant plus que la figure est réalisée sur un fond noir qui augmente la perception des contrastes. La méthode autorise donc, de notre point de vue, la représentation d'une quantité d'informations plus importante, la perception d'une information qui était auparavant illisible. L'introduction de la transparence n'est toutefois pas une condition suffisante pour la cartographie des matrices antisymétriques (Fij-), car elle ne résout pas, à elle seule, le problème lié à la réalisation de deux cartes pour un même indicateur. Elle nécessite, pour cela, d'être associée à une utilisation judicieuse de la couleur.

La sémantique de l'opposition colorée appliquée aux flux

La couleur est mise en œuvre de deux manières en cartographie statistique, selon qu'elle est utilisée seule, comme une teinte unie, ou en association avec la variable visuelle valeur, sous la forme de nuances de teintes.

Dans le premier cas, la couleur est appliquée à des valeurs nominales, caractéristiques qualitatives des objets. C'est le cas, par exemple, de la cartographie de modes d'occupation des sols variés, en fonction d'une typologie de type 'espaces en eau' ; 'espaces urbanisés', 'espaces agricoles' qui prennent des teintes distinctes. Dans le deuxième cas, la couleur est appliquée à des variables quantitatives continues qui ont été discrétisées en k plages distinctes de valeurs, sur lesquelles s'applique la valeur. Il s'agit d'une variable visuelle de l'image, fortement sélective, qui entraîne l'utilisation d'un camaïeu de k tons (un par plage de valeurs) ordonnés d'une même teinte. C'est parce que cette teinte est souvent colorée (c'est-à-dire non nécessairement en niveaux de gris) que les variables visuelles valeur et couleur sont généralement associées, pour combiner leurs propriétés respectives d'associativité et de séparation. Cette combinaison se justifie d'autant plus que la série analysée présente des valeurs positives ou négatives, dont la concomitance justifie l'utilisation de la notion de contraste de couleurs, de la sémantique de l'opposition colorée aussi qualifiée d'inversion ou de divergence des valeurs (Harrower, Brewer, 2003 ; Chesneau, 2006 ; Brewer, Harrower, 2009).

Le contraste coloré est spécifique à l'utilisation de la couleur. Il permet d'associer des teintes chaudes-froides ou encore claires-obscures pour signifier une opposition. En effet, pour représenter le changement de polarité des valeurs, il convient d'utiliser des teintes opposées pour distinguer les valeurs en fonction de leur signe. L'utilisation de cette sémantique d'opposition permet de renforcer la propriété de séparation de la couleur. En cartographie statistique, cette utilisation combinée des variables visuelles valeur et couleurs opposées est toujours et exclusivement mise en œuvre lorsque l'implantation des objets est surfacique et ponctuelle, plus rarement linéaire. Lorsqu'elle est mise en œuvre sur des figurés en implantation linéaire, le principe d'application de la Couleur est toujours classique : les bandes ou les liens sont affectés d'une coloration discrétisée à la manière des points pour renforcer l'appartenance à des classes de valeurs issues d'une discrétisation, comme illustré par la figure 9.

Le résultat n'est pas dénué d'intérêt lorsque la matrice est dense. La méthode permet de ne réaliser que k classes de tailles des figurés, une pour chaque nuance de teinte et non une représentation proportionnelle de l'ensemble des figurés. Un ajustement efficace de la taille des figurés, associée à chacune des classes, présente aussi l'avantage de résoudre les problèmes liés à un étalement important des valeurs statistiques. Cette utilisation classique de l'opposition colorée ne résout pas, pour autant, le problème posé : le transfert net des flux demeure illustré par deux cartes.

L'association valeur et couleurs opposées, telle qu'elle est mise en œuvre en cartographie statistique, ne semble pas faire l'objet, à notre connaissance, d'une application pour les objets de flux, c'est-à-dire au niveau des liens représentés par des bandes de taille variable. Lorsque la matrice est dense et orientée, le transfert de la sémantique d'opposition au niveau des liens permet de conserver la hiérarchie des lieux et de résoudre le problème de l'effet de convergence des flux, sans souffrir de la résolution des contraintes graphiques liées à l'utilisation de la flèche. Dans un style en blanc et noir, les figurés étant portés en blanc, il est dès lors possible de supprimer les têtes de flèches afin de ne pas alourdir la figure, puis de transférer l'opposition colorée au niveau des bandes, comme illustré par la figure 10.

On observe sur la figure 10, que le fait d'utiliser un gradient de couleurs opposées pour représenter le transfert net revient à fusionner en un seul objet, les cartes de créances et de dettes présentées sur la figure 8. Le résultat produit une image unique qui présente une seule relation dont la particularité est d'être antisymétrique : il s'agit bien d'une même quantité échangée entre deux lieux, mais dont la signification varie en fonction du point de vue (du lieu) duquel on l'observe. En reprenant la métaphore financière, c'est comme si le lieu fonctionnait tel une banque qui prête aux unes et emprunte aux autres banques, la convergence des teintes rouges et bleues permettant de qualifier les perdants et les gagnants.

L'utilisation d'une opposition colorée au niveau des bandes est fructueuse. Elle présente plusieurs avantages qui sont, en premier lieu, d'évincer la flèche, tout en conservant le sens des flux par le système d'opposition colorée. Sur la figure 10, les teintes orangées illustrent l'origine des flux, l'émissivité des lieux tandis que celles qui sont bleutées indiquent la destination ou la réceptivité des flux. La double coloration conduit aussi au dédoublement du nombre de figurés sans qu'il soit nécessaire de ne représenter qu'une partie des valeurs (les créances ou les dettes). Il n'est, en outre, plus nécessaire de réaliser deux cartes, comme sur la figure 8 et cela, quelle que soit la thématique. Cette méthode conduit aussi à résoudre le problème de la représentation de **l'effet de convergence** puisque, sur des données réelles, nous avons observé qu'il n'était plus nécessaire de représenter les lieux, aux côtés des liens.

Pour démontrer l'efficacité du transfert à la cartographie de flux de ces deux critères de **transparence** et d'opposition colorée au niveau des liens, nous les avons mis en œuvre sur une matrice asymétrique qui décrit les flux domicile-travail de l'Isère pour l'année 2010. Les données sont issues du fichier détail MOBPRO (Insee, 2010), elles sont représentées à l'échelle communale. La partie haute de la figure 11 illustre l'application de la **transparence** sur la matrice (Fij+), en utilisant le critère de la longueur des liens ; la largeur des liens correspondant donc à (Fij+). La partie basse illustre l'application de la **transparence**, associée à l'opposition colorée pour cartographier la matrice (Fij-). Sur la carte du haut, l'application de la **transparence** seule conduit à la perception de cet **effet de profondeur** relatif à la variation apparente de teinte. Les flux les plus courts étant volontairement placés au premier plan, ils correspondent à des mobilités locales qui sont également visibles sur la partie basse, aux principaux pôles d'emplois du département. Ces courts liens sont les plus opaques, ils présentent les teintes les plus foncées qui renforcent la perception des motifs bleutés de la carte du bas.

Les données portant sur des mobilités quotidiennes, il n'y a pas lieu d'analyser la carte du bas (Fij-) du point de vue des gains ou des pertes. Ce qu'il faut y voir, c'est plutôt la mise en évidence de cycles de présence diurne et nocturne en fonction de l'activité. En effet, les lieux de convergence des bandes bleues correspondent aux pôles d'emplois où la population est augmentée pendant les heures de travail, tandis que ceux des bandes rouges correspondent aux lieux résidentiels où la population est augmentée la nuit et le week-end. La partie bleue des courts liens met ainsi en évidence la topographie du département (fig. 12) : le cœur du Y grenoblois coincé entre les massifs du Vercors à l'ouest, de la Chartreuse au nord, de Belledonne et de l'Oisans à l'est. Aussi, les principaux axes de circulation participent-ils, très probablement, de ces mobilités quotidiennes : la rocade sud A480, qui dessine une première couronne fonctionnelle du sud-ouest au nord-est de la ville de Grenoble, l'autoroute A48 vers Voiron, puis vers les villes de Bourgoin-Jallieu et de l'Isle-d'Abeau situées plus au nord du département ; l'autoroute alpine A41 vers la Savoie, en passant par Pontcharra et Allevard. Les pôles secondaires attractifs de ce système de mobilité quotidienne sont ainsi également perceptibles sur les deux cartes, alors qu'il ne s'agit pas du même indicateur.

Conclusion

La possibilité de recourir à la transparence pour cartographier des matrices de flux denses réside dans la possibilité inédite, à notre connaissance, de représenter toute l'information disponible dans la matrice et cela, sans souffrir de l'effet-spaghetti. Elle autorise, en effet, la perception des figurés qui sont les plus petits en valeur, qui sont placés à l'arrière-plan de la figure et figurés en transparence de ceux qui sont situés au premier plan. La perception de ces figurés qui sont à l'origine de la complexité graphique de la figure, caractéristique de l'effet-spaghetti, est améliorée, en même temps que leur effet négatif est amoindri. Le fait que les figurés les plus longs présentent les teintes les plus transparentes – qui sont perçues comme les plus claires – n'est pas gênant puisque leur longueur est suffisante pour permettre leur discrimination visuelle, par rapport aux courts flux placés au premier plan. Leur perception n'est pas amoindrie en raison d'un effet positif de ce qui est, dans la version classique de la carte, un problème lié à leur couverture spatiale. L'usage des bandes proportionnelles permet aussi de résoudre le problème lié à la représentation conjointe de l'effet des flux au niveau des liens et des lieux, d'annuler la contrainte de la représentation de la convergence des flux.

Cette sémiologie graphique permet enfin de mettre en évidence l'existence d'une hiérarchie des flux qui nous conduit à émettre deux hypothèses : d'une part, l'existence d'une forme d'attractivité des lieux représentée ici par l'effet de polarité des bandes orientées, en opposition colorée pour traduire leur sens et cela, sans recourir à la flèche. D'autre part, l'existence de différentes classes de longueurs de bandes dirigées vers ces lieux attractifs ce qui correspond, dans la réalité, à différentes classes de distances des flux, à différents types de mobilité spatiale. La question de la perception de ces classes apparentes de distances parcourues par les flux peut être améliorée sur le plan statistique, par le recours à des indicateurs qui la prennent en compte. Elle peut aussi être enrichie par une action réalisée

exclusivement au niveau sémiologique, en particulier sur la mise en œuvre de la variable visuelle taille afin d'intégrer une variable spatiale : la distance parcourue par le flux.

Bibliographie

Bahoken F., 2012, 2014, « Contribution du raisonnement logique à la cartographie des flux », dans *Actes du colloque international d'analyse spatiale et de géomatique* (SAGEO'2012), Liège, Belgique, 6-9 novembre 2012, p.13-29. Communication sélectionnée et publiée dans la *Revue internationale de géomatique* (RIG), vol. 24 – n° 2/2014, p. 231-250, sous le titre : « L'intérêt du raisonnement logique en cartographie des flux. L'exemple de migrations internes. »

Bertin J., 1967, « La représentation du mouvement dans le plan », dans Bertin J., *Sémiologie graphique*, Gauthier-Villars, Paris, p. 342-355.

Bonin O., Bahoken F., Mermet S., 2013, « CARTOD/MAPOD, une application de géovisualisation des matrices de flux Origine-Destination », *Revue M@ppemonde*, Rubrique «Vu au Festival International de Géographie – Concours de géovisualisation : palmarès 2013 », n° 112, n° 4/2013. http://mappemonde.mgm.fr/num40/fig13/fig13401.html

Breukelman J., Brink G., De Jong T., Floor H., 2005, "Selecting Flow Data, Manual", *Flowmap software* v.3.2, Faculty of Geographical Sciences, Utrecht University, the Netherlands, p. 42-44.

Brewer C., Harrower M., 2009, *Colorbrewer: Color advice for maps*,URL : http://colorbrewer2.org/

Chesneau E., 2006, *Modèle d'amélioration automatique des contrastes de couleur en cartographie - Application aux cartes de risques*, Thèse de doctorat, Université de Marne-La-vallée - IGN, France, 372 p.

Harrower M., Brewer C., 2003, "Colorbrewer.org: an online tool for selecting colour schemes for maps", *The Cartographic Journal*, vol. 40, n°1, p. 27–37.

Jégou L., 2013, *Enquête cartographie et esthétique. Synthèse et commentaires des résultats – deuxième version*, rapport de recherche non publié, 48 p.

Mac Eachren A., 1992, "Visualizing uncertain information", *Cartographic Perspectives*, n°13, p. 10-19.

Mac Eachren A., 1995, *How maps work,* New York, NY, USA, The Guilford Press.

Roth R.E., Woodruff A.W., Johnson Z.F., 2010, "Value-by-alpha Maps: An alternative technique to the cartogram", *The Cartographic Journal*, vol.47, n°2, 12 p.

Tobler W., 1979, "Estimations of attractivities from interactions", *Environment and Planning A.*, vol. 11, p. 121-127.

Tobler W., 1982, "Cartographic study of movement tables", presentation in the *National Computer Graphic Assembly - Session on Statistical Graphics - Mapping*, Anaheim, 17-06-1982.

Tobler W., 1987, "Experiments in migration mapping by computer", *American Cartographer*, n°14, p. 155-163.