

Pour le renouvellement de la sémiologie de la carte de flux

Françoise Bahoken

▶ **To cite this version:**

Françoise Bahoken. Pour le renouvellement de la sémiologie de la carte de flux. Cartes & géomatique, 2014, Enseigner la sémiologie, 222. halshs-02937125

HAL Id: halshs-02937125
https://shs.hal.science/halshs-02937125

Submitted on 14 Sep 2020

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.

Manuscrit auteur, publié dans le numéro 222 de la revue *Cartes & Géomatique*, du Comité Français de Cartographie (CFC), Dossier « Enseigner la sémiologie », pp. 109-121.

Pour le renouvellement de la sémiologie de la carte de flux

Françoise Bahoken[1,2]

[1] Université Paris-Est / Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux (IFSTTAR), Cité Descartes, 14-20 bd Newton, 77447 Marne-la-Vallée cedex 2, France.
[2] UMR 8504 Géographie-Cités / PARIS, Paris, France.

Résumé : *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 la partie de la matrice qui correspond à la quantité transférée entre les lieux, ce qui oblige à la résolution des problèmes rencontrés. Etant donné que celle-ci peut être réalisée à plusieurs moments du processus de cartographie, nous proposons d'examiner des solutions qui sont d'ordre exclusivement sémiologique. 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 sémiologique de la figure, elle renforce aussi la perception des motifs généraux permettant de renouveler la sémiologie de la carte de flux

Mots-clés : *matrice de flux, cartographie, volume, bilan net, Taille, couleur, Noir.*

1. Introduction

La cartographie des matrices de flux pose traditionnellement de nombreuses difficultés qui sont d'ordres théoriques, méthodologiques et pratiques. Ces difficultés correspondent à différents effets graphiques qui se manifestent sur la carte, en la rendant illisible. Etant donné que la résolution de ces problèmes peut être effectuée à plusieurs moments du processus de cartographie, depuis le traitement des données jusqu'à leur représentation, nous proposons d'examiner des solutions qui sont d'ordre exclusivement sémiologique. Ces solutions peuvent aussi 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[1].

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 réalisés 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 et variable visuelle. 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 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. L'idée est d'examiner les variations de sa figure cartographiée liées à l'application des solutions sémiologiques proposées, la démonstration étant illustrée par une représentation simplifiée de (Fij) sous la forme d'une carte, dans un espace millimétrique. Nous présentons, dans un premier temps, les données disponibles dans cette matrice, telles qu'elles ont été observées. Nous assumons ensuite la position de W. Tobler (1979, 1982) de décomposer les matrices en deux sous-parties, afin de pouvoir disposer de deux matrices complémentaires : l'une décrivant la partie symétrique des échanges (Fij+) et l'autre, la partie antisymétrique (Fij-). Le rappel des principes classiques de sémiologie graphique des flux appliqués à ces trois matrices (Fij) 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*.

2. 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) 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 sont, par conséquent, pas défini : (Fii= ϕ).

Cette matrice est valuée, la donnée (Fij) portée au croisement d'une ligne et d'une colonne, correspond à une quantité mesurable : il s'agit d'une variable quantitative, discrète ou continue, qui s'exprime dans l'intervalle [- ∞; +∞[. La matrice peut ainsi prendre des valeurs positives et/ou négatives en fonction de la thématique et du type de flux qu'elle décrit: Fij ∈ [- ∞; +∞[.

La fig. 1 décrit la matrice 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 sont disponibles pour l'analyse. Cette matrice est aussi asymétrique : si i≠j, alors Fij ≠ Fji. Elle est volontairement simplifiée pour pouvoir être présentée facilement, dans le cadre d'un enseignement.

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

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

A partir de la matrice de la fig. 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 – ou pas – en indicateurs, tout dépend de l'auteur. Sur le plan cartographique, nous suggérons plutôt la représentation d'un indicateur des flux, plutôt que des valeurs observées, car elle permet de lisser l'effet visuel de la carte des flux, de réduire sa complexité analytique et parfois graphique, en présence d'une sémiologie adaptée. Lorsqu'elle est dense ou formée de plusieurs lieux, la figure est, en effet, supposée être fortement soumise à un effet de surcharge graphique, *l'effet-spaghetti* (Breukelmann et al., 2005) ainsi qu'à *un effet de couverture spatiale* qui se traduit par la présence de très longs flux qui traversent la carte, de manière apparemment anarchique.

L'opération qui consiste à transformer les valeurs de flux en indicateurs 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 indicateurs 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 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* » qui correspond au sous-bassement du système, et de la « *dynamique du système d'échanges* » de la matrice (Fij). Elles présentent aussi l'avantage de symétriser la matrice (Fij), ce qui conduit à une réduction quantitative du nombre de figurés à représenter puisque :

(Fij+) = (Fij+Fji)/ 2

(Fij-)= (Fij-Fji) / 2

Nous généralisons ces résultats en qualifiant les cartes obtenues de volume de flux pour le (Fij+), de bilan net de flux pour le (Fij-). Il est possible d'introduire une troisième possibilité 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.

Cette posture nous place devant cinq matrices qui sont issues de la matrice de départ (Fij), elles sont présentées sur la fig. 2. Il s'agit des valeurs observées (Fij), de leur transposée (Fji) utilisée dans le calcul des indicateurs à l'origine des matrices suivantes ; de (Fij+) ; de (Fij-) et de l'asymétrie. Il est possible d'aller plus loin, en adoptant d'autres raisonnements qui conduisent à la mise en œuvre de nouveaux indicateurs, en appliquant par exemple un raisonnement logique (Bahoken, 2012), ou bien en intégrant la dimension spatiale. Sans rentrer dans les détails de cette seconde proposition qui fait l'objet d'un autre développement, nous suggérons de pondérer[2] la valeur de ces différents indicateurs, par une acceptation de la distance parcourue par le flux (Dij). Cela signifie qu'il faille considérer, pour chacun de ces indicateurs, d'autres possibilités de cartographie qui diffèrent en fonction de la manière dont la distance est prise en compte dans le calcul des valeurs de la matrice.

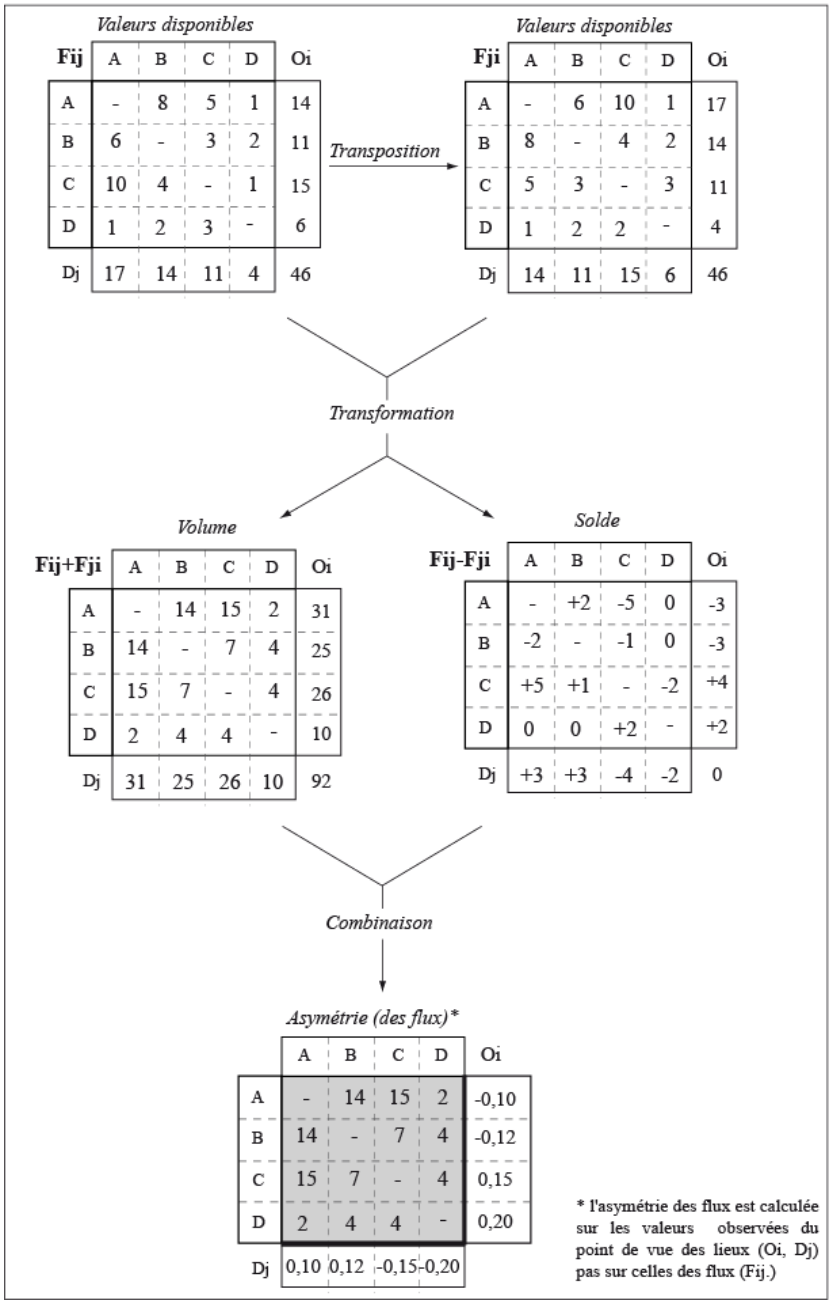


Figure 2. Les matrices issues de la matrice (Fij) de départ

Quelle que soit la forme de ces indicateurs, trois familles de méthodes de cartographie de flux peuvent être mises en œuvre pour représenter les matrices de la fig 2..

La première concerne les matrices dont les valeurs sont définies symétriques positives, elle peut être illustrée par la cartographie du volume de flux (Fij+). La seconde famille concerne les matrices dont les valeurs sont asymétriques, respectivement positives et négatives de part et d'autre de la diagonale principale : elle peut être illustrée par la représentation du bilan net (Fij-). La troisième famille concerne la cartographie de combinaisons complexes, illustrée par l'asymétrie de flux, elle n'est pas présentée ici.

Si ces trois 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 issues des deux premières familles.

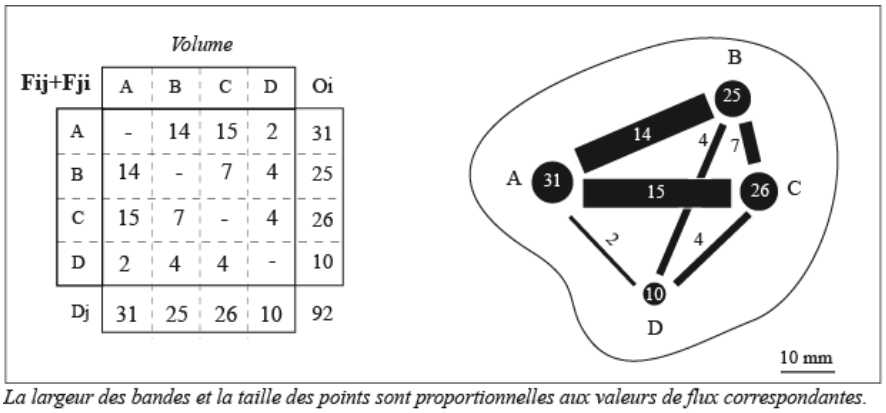
3. Aspects sémiologiques de la carte de flux classique

La cartographie des données disponibles dans n'importe laquelle des matrices de flux présentées sur la fig. 2 nécessite de placer sur une carte, 6 figurés qui correspondent aux flux observés entre les lieux, et 4 autres pour leur effet sur la distribution des lieux.

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[3] d'ordre graphique ou même cartographique. Ce trait qui est toujours orienté sera, en revanche, éventuellement assorti d'un sens, 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 orientation). 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 (i,j) 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, ou leur effet observé au niveau des lieux, nécessite d'être proportionnel à la valeur représentée.

Les choix graphiques et d'ordre sémiologique, imposés ou pas, sont nécessairement contraints par la composante spatiale. Le résultat de leur application est présenté sur la fig. 3 qui illustre le cas classique de la cartographie du volume de flux (Fij+).



.

Figure 3. La sémiologie classique de la carte du volume de flux

La fig. 3, présente une carte de flux de type *volume-volume* où l'indicateur est représenté au niveau des liens et des 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 des liens placé au droit des lieux. Ces liens prennent la forme de bandes, dont la surface est mesurable, et où la largeur est proportionnelle à la valeur du flux.

Il convient de noter que la représentation du volume n'est pas orientée, l'indicateur correspondant à une quantité 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).

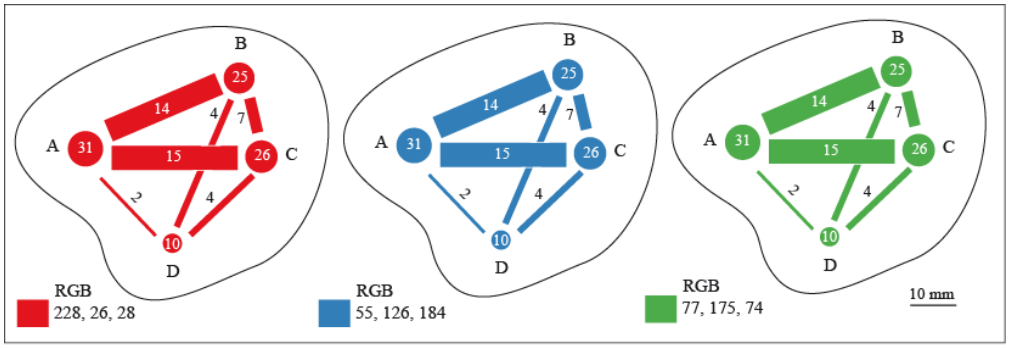
Sur la fig. 3, quatre composantes de sémiologie sont mobilisées : la localisation des (couples de) lieux, le point, la bande (ou le trait droit), la *Taille* et la *Couleur*. Les figurés sont réalisés en noir, ils sont placés sur un fond blanc ce qui correspond à un style qualifié de noir-et-blanc, mais il aurait pu en être autrement.

3.1. Le choix de la couleur

Sur le plan sémiologique, la cartographie du volume de flux fait appel à une série statistique composée de valeurs discrètes qui sont symétriquement positives, comme illustré par la fig. 1. Elle ne nécessite donc pas l'utilisation d'une couleur particulière, au sens de teinte. C'est d'ailleurs la raison pour laquelle la fig. 3 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 assortie à la *Valeur*. Nous en concluons que le recours à la couleur est inutile, dans le cas spécifique de la cartographie du volume de flux.

La fig. 3, 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, mais pas seulement. 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 fig. 4.



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

Figure 4. Illustration du caractère facultatif de la teinte

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*. 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'invertir 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 fig. 5. compare la figure classique des flux (à gauche), à son négatif (à droite) représentée en blanc-et-noir.

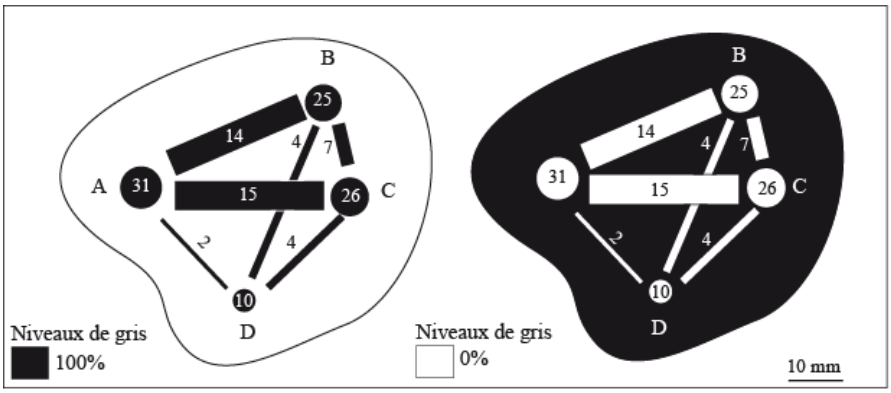


Figure 5. Vers une nouvelle esthétique de la carte de flux

Cette fig. 5 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 : d'une part, de laisser les figurés en blanc, ce qui permet de les réserver à l'utilisation d'autres variables visuelles telles que la *Valeur*, par exemple, ou encore la *Transparence* (Mac Eachren, 1995), nous y reviendrons dans la section 4. ; de l'autre, de permettre 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. Il ne s'applique pas à celles qui ne le sont pas, en raison de l'importance du sens des flux. Dans ce cas, il est nécessaire d'examiner la sémiologie du bilan des échanges, qui correspond au (F-).

3.2. Le choix du figuré

En présence d'une matrice asymétrique où, pour tout i≠j, Fij≠Fji, il est préférable de cartographier le bilan ou solde de flux (Fji-). Du point de vue des lieux, cette différence entre les valeurs de flux entrantes et sortantes correspond à la variation de leur population, tandis que du point de vue des liens, elle décrit le bilan net dont il faut représenter le sens, par une flèche, pour distinguer les lieux qui perdent de ceux qui gagnent.

Sur le plan sémiologique, la cartographie du bilan net diffère fondamentalement de celle du volume, car elle nécessite de prendre en compte le sens des flux. Celui-ci se traduit par la polarité de leur valeur, leur caractère positif ou négatif, voire nul qui correspond à un bilan équilibré. La représentation graphique d'un lien orienté nécessite donc le recours obligatoire au procédé graphique de la flèche sur lequel sera appliqué, comme précédemment, la *Taille*, puisque les liens sont valués.

Plusieurs possibilités sont envisageables pour cartographier le bilan net. La première d'entre elles consiste à représenter l'ensemble des valeurs de la matrice sur la même carte, tel qu'illustré par la fig. 6., selon la même esthétique du blanc-et-noir.

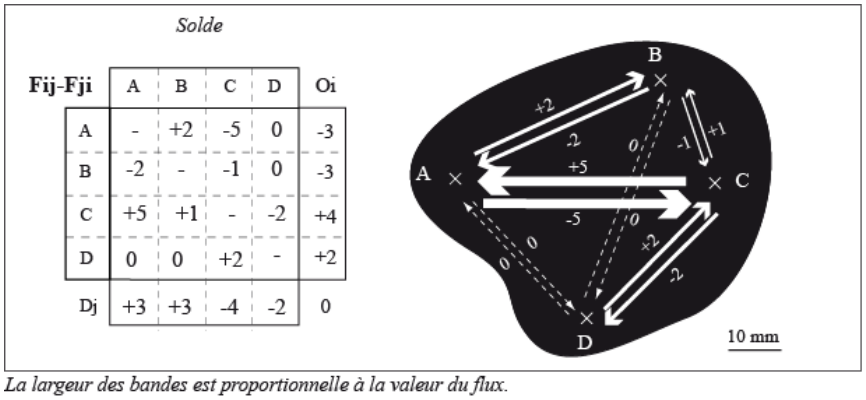
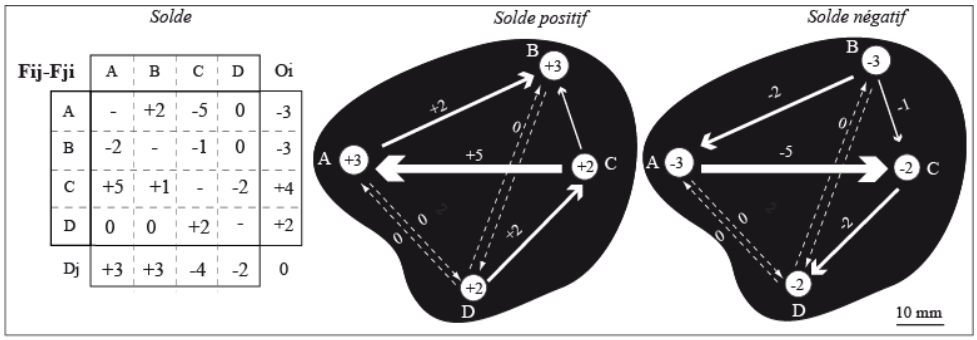


Figure 6. La sémiologie classique du bilan net

La représentation sur la même carte, de valeurs de flux symétriquement négatives et positives entraîne, d'une part, une confusion dans la caractérisation des lieux émetteurs et récepteurs, dont le solde au lieu ne peut être représenté, puisque les valeurs s'annulent. D'autre part, une démultiplication du nombre de figurés qui présentent des orientations opposées, pour des tailles identiques. Pour pallier à cet écueil lié à la prise en compte du sens des flux, une variante efficace de la solution classique consiste à réaliser deux cartes : la première pour les valeurs négatives et la seconde pour les valeurs positives, comme illustré par la fig. 7.



Fij-Fji	A	B	C	D	Oi
A	-	+2	-5	0	-3
B	-2	-	-1	0	-3
C	+5	+1	-	-2	+4
D	0	0	+2	-	+2
Dj	+3	+3	-4	-2	0

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

Figure 7. La sémiologie classique du bilan net (variante)

Les cartes de solde positif et négatif non symétrisées présentent la particularité d'être identiques, à la différence près du sens des flèches, lié à la polarité de leur valeur. Etant donné que le choix de l'une ou de l'autre carte dépend souvent de la problématique sous-jacente, nous faisons le choix dans la suite de ne représenter que les valeurs positives du bilan, ce qui revient à ne représenter que la carte de la partie centrale de la fig. 7.

La représentation du bilan net, tel que présenté sur la fig. 7, est une méthode efficace qui nécessite, lorsque les données sont réelles, de présélectionner les figurés à représenter ce qui revient à sélectionner les valeurs, afin de ne représenter que les flux principaux ou en « […] *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). Sur le plan cartographique, les raisons tiennent à la manifestation de *l'effet-spaghetti*, aussi à l'effet de *couverture spatiale* qui correspond aux trop longs flux qui traversent la figure de part et d'autre, mais pas seulement. La carte de flux figure serait illisible sans présélection des données, car elle cristallise un autre problème important de la cartographie de flux à savoir, celui de la représentation de *l'effet de convergence des flux* au droit des lieux d'origine et de destination. Cet *effet de convergence* est une contrainte graphique forte qui est liée au placement des pointes de flèches nécessaires à la représentation du sens des flux.

Une manière de résoudre ces différents problèmes consiste à agir au niveau sémiologique, sur les critères qui définissent la couleur, tels qu'ils mobilisés en Informatique graphique.

4. 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 *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 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, 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), et 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.

4.1. 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 elle 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.

Elle 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, ce qui explique la proximité des dénominations. La VBA est s'apparente à un clin d'œil 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 qui sont incertaines (Mac Eachren, 1992) ou qui sont 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. L'intérêt de son utilisation dans le contexte spécifique de la cartographie de flux est donc avéré. Il réside dans l'amélioration de la saillance des figurés, aussi dans la perception de la masse de petits flux diffus, qui présentent de faibles valeurs, et qui ne seraient pas perceptibles autrement.

Pour renforcer la perception des différentes catégories visuelles de liens, qui se distinguent, par leur taille ou par leur longueur, il convient de recourir en outre à la suggestion de W. Tobler (1987), 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.

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'information plus importante, la perception d'une information qui était auparavant invisible.

L'introduction de la *Transparence* n'est toutefois pas une condition suffisante à la cartographie des matrices asymétriques, elle nécessite d'être associée à une utilisation judicieuse de la *Couleur*.

4.2. 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.

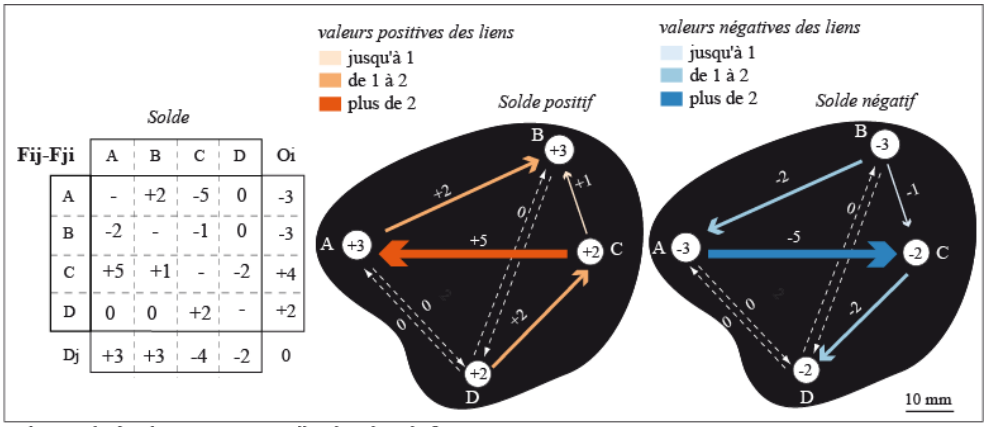
Dans le premier cas, la *Couleur* est appliquée à des valeurs nominales, caractéristiques qualitatives des objets. C'est le cas, par exemple, de la cartographie de modes d'occupation des sols variés, en fonction d'une typologie de type 'espaces en eau' ; 'espaces urbanisés', 'espaces agricoles' qui prennent des teintes distinctes.

Le second cas d'utilisation classique de la *Couleur* est mis en œuvre sur 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 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 du contraste de couleurs, de la sémantique de l'opposition colorée aussi qualifiée d'inversion ou de divergence des valeurs.

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 affectées 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 fig. 8.



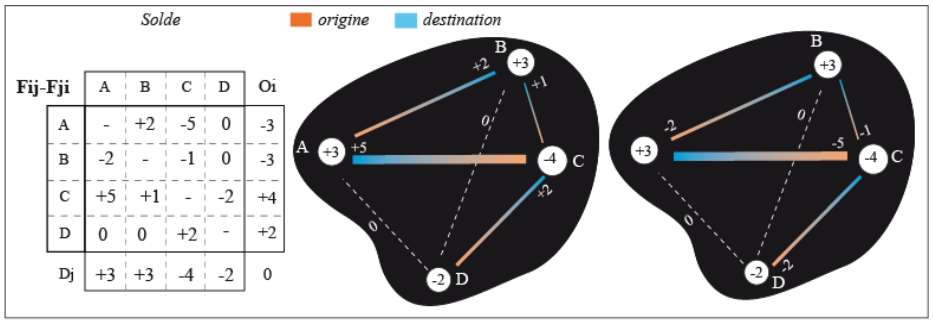
La largeur des bandes est proportionnelle à la valeur du flux.

Figure 8. Le principe de l'utilisation classique des nuances de teinte opposées

Ce procédé n'est pas dénué d'intérêts, lorsque la matrice est dense : il permet de ne réaliser que *k* classes de tailles des figurés, une pour chaque nuance de teinte, et pas une représentation proportionnelle de l'ensemble des figurés. Un ajustement efficace de la taille associé à chacune des classes présente aussi l'avantage de résoudre les problèmes liés à un étalement important des valeurs statistiques.

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 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 fig. 9.



Fij-Fji	A	B	C	D	Oi
A	-	+2	-5	0	-3
B	-2	-	-1	0	-3
C	+5	+1	-	-2	+4
D	0	0	+2	-	+2
Dj	+3	+3	-4	-2	0

Figure 9. Le renouvellement de la sémiologie classique du bilan net

L'utilisation d'une opposition colorée au niveau des bandes est fructueuse. Elle présente plusieurs avantages. Elle permet en premier lieu, d'évincer la flèche, tout en conservant le sens des flux par le système d'opposition colorée. Sur la fig. 8, les teintes orangées illustrent l'origine des flux, l'émissivité des lieux tandis que celles qui sont bleutées indiquent la destination ou réceptivité des flux. La double coloration conduit aussi au dédoublement du nombre de figurés sans qu'il ne soit nécessaire de ne représenter qu'une partie des valeurs, celles qui sont positives ou négatives. Il n'est, en outre, plus nécessaire de réaliser deux cartes, comme sur la fig. 7 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 fig. 10. illustre l'application de la *Transparence* sur la matrice (Fij) en utilisant le critère de la longueur des liens. La partie basse illustre l'application de la *Transparence*, associée à l'opposition colorée pour cartographier la matrice (Fij-).

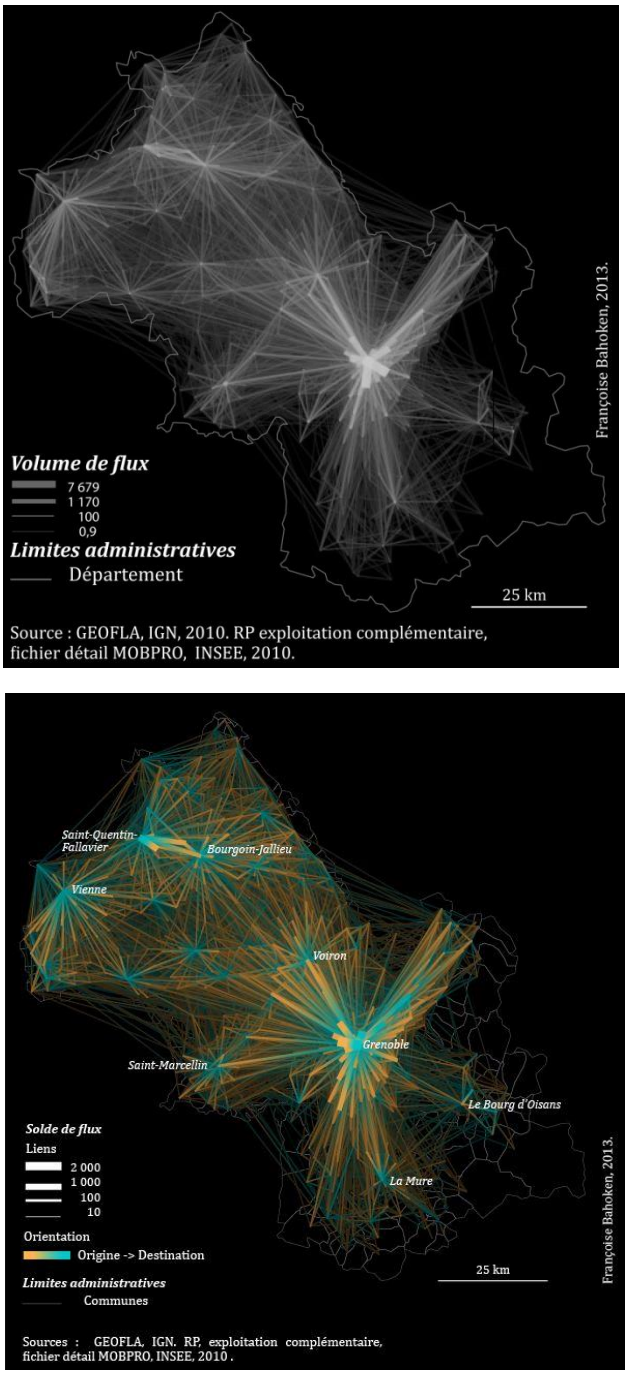


Figure 10. Application à la cartographie de flux domicile-travail de l'Isère

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 droite, aux principaux pôles d'emplois du département. Ces courts liens présentent les teintes les plus foncées, qui correspondent aux motifs bleutés de la carte du bas. Ils mettent en évidence 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 qui participent, 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, aussi 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 mobilités quotidiennes sont ainsi également perceptibles sur les deux cartes, alors qu'il ne s'agit pas du même indicateur.

5. Conclusion

La possibilité de recourir à la *Transparence* pour cartographie des matrices de flux, 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, et qui sont placés à l'arrière-plan de la figure en transparence de ceux qui sont situés au premier plan, de ces figurés qui sont à l'origine de la complexité graphique caractéristique de *l'effet-spaghetti.* 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 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, dans la réalité, correspond à différentes classes de distances des flux.

La question de la perception de ces classes apparentes de distances parcourue 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, sur la mise en œuvre de la variable visuelle *Taille*.

6. Bibliographie

Bahoken, F., 2012, Contribution du raisonnement logique à la cartographie des flux, *Actes du colloque International d'Analyse Spatiale et de Géomatique* (SAGEO'2012), Liège, Belgique, 6-9 novembre 2012, pp.13-29. Communication sous presse pour une publication dans la *Revue Internationale de Géomatique* (RIG), sous le titre L'intérêt du raisonnement logique en cartographie des flux. L'exemple de migrations internes.

Bonin, O., Bahoken F., Mermet S (sous presse), CARTOD/MAPOD, une application de géovisualisation des matrices de flux Origine-Destination, *Revue M@ppemonde*, Rubrique « Lieux dont on parle ».

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

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, pp. 42-44.

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 Perspec*tives, n°13, pp. 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, pp. 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, pp. 155-163.

[1] Les applications sont présentées sur le site http://ilya.boyandin.me/ ; les codes sont disponibles librement à l'adresse : code.google.com/p/jflowmap/

[2] L'intérêt du recours à des indicateurs qui prennent en compte la distance spatiale est de proposer des variantes à la carte de flux classique qui corrigent la perception de la distance traduite par la longueur du lien.

[3] Le lecteur intéressé par ces solutions qui conduisent à la transformation de l'apparence visuelle du lien pourra consulter, à titre d'exemple, les travaux réalisés par O. Bonin et al. (*sous presse*).