

La perception du mouvement dans la visualisation : le cas des graphes

Motion perception in visualization: the case of graphs

Agnès SAULNIER, Jérôme THIEVRE, Marie-Luce VIAUD

INA

4, avenue de l'Europe

94366, Bry-sur-Marne, France

{asaulnier, jthievre, mlviaud}@ina.fr

Résumé. La sémiologie graphique telle qu'elle a été introduite par Bertin définit un système de signes complet, indépendant et possédant ses lois propres pour construire des images sur un plan. C'est un système très puissant pour retenir, comprendre et communiquer des informations. Dans cet article, nous nous appuyons sur des résultats d'expériences menées sur la perception du mouvement pour émettre des hypothèses sur l'extension de la sémiologie graphique aux systèmes de visualisation graphique interactifs. Pour cela, aux variables visuelles de Bertin que sont l'ensemble des variables rétinienne et les deux dimensions du plan, nous proposons d'introduire le temps en ajoutant une variable mouvement. L'utilisation de cette variable est ensuite étudiée et discutée dans le cas de la visualisation de graphes.

Mots-clés. Visualisation d'informations, graphe, sémiologie graphique, perception, mouvement, variables visuelles.

Abstract. The semiology of graphics introduced by Bertin is a complete system composed of signs and rules in order to build planar maps or diagrams. This system is efficient to represent, memorize, understand and communicate information. In this paper, we give an overview of a set of experiments in motion perception. Then, we study how Bertin's system could be extended with one additional dimension, the movement. The combination of this new variable with existing static ones will be studied according to the properties of visual perception and applied to graph visualisation.

Keywords. Information visualization, graph, graphic semiology, perception, movement, visual variables.

1 Introduction

La puissance des systèmes graphiques est reconnue depuis longtemps. A l'origine, les cartes étaient conçues pour reproduire la réalité. Depuis, de nombreux systèmes de représentations graphiques ont été développés pour traiter des données abstraites. Ces graphiques permettent de traiter de grandes quantités de données qui seraient sinon difficiles à appréhender dans leur globalité. Ainsi, la visualisation est passée de la fonction d'inventaire et de communication à une fonction de traitement et d'analyse de l'information. D'autre part, l'informatique a introduit la notion d'interaction en tant qu'instrument instantané de manipulation visuelle des données. Dans le contexte actuel où le nombre et la complexité des données croissent exponentiellement alors que les capacités de perception humaine restent constantes, il devient intéressant d'étudier les extensions potentielles du système de représentation graphique.

Si les variables visuelles jouent un rôle essentiel dans la visualisation, l'efficacité d'un système s'étudie sur l'intégralité du processus, à savoir le passage des données abstraites stockées dans l'ordinateur à la cognition de l'utilisateur. En effet une visualisation pourra être dite plus efficace qu'une autre si un grand nombre d'informations peut être perçu et assimilé plus rapidement ou avec moins d'erreurs. Le processus se décompose donc en plusieurs étapes. Les données sont traitées par différents outils informatiques afin de constituer des ensembles de relations plus structurées que l'on associera à des structures visuelles. Tandis que le traitement des données repose sur des relations mathématiques, les structures visuelles s'appuient sur des propriétés graphiques faciles à interpréter par la vision humaine. L'image ainsi produite est ensuite perçue et décodée par l'utilisateur. Ainsi, en comprenant comment est décodée l'information contenue dans le graphique, il est possible d'en améliorer l'utilisation.

Beaucoup d'avantages sont pressentis sur l'utilisation du mouvement dans les systèmes de visualisation. En effet, superposé de façon transitoire à une visualisation statique, le mouvement ne prendrait pas beaucoup d'espace supplémentaire, il ne bouleverserait pas la visualisation statique et il permettrait d'accroître la dimension d'une visualisation statique sans surcharger sa densité. Enfin, il pourrait améliorer ponctuellement la lisibilité d'une visualisation graphique complexe ou mettre en évidence des éléments difficiles à distinguer. L'utilité du mouvement paraît donc évidente, mais il existe peu d'études sur la manière de l'utiliser efficacement. D'autre part, le mouvement est encore aujourd'hui largement sous-exploité dans les systèmes de visualisation. On ne le trouve essentiellement que dans les tâches suivantes : transition dans des changements de vues ; exécution de processus ; affichage d'une variation spatiale ou temporelle ; description du comportement d'un objet ; signalisation (alerte ou affichage d'une sélection). Remarquons que dans les quatre premiers cas, ce n'est pas la nature du mouvement qui est significative mais seulement l'objet qui est en mouvement. Ainsi le mouvement est sous-exploité car il n'est pas utilisé pour ses capacités de codage visuel. Partant de ce constat, notre recherche porte sur l'étude du mouvement en tant que variable graphique.

L'objectif de cette publication est de dresser un état de l'art sur la perception du mouvement afin d'émettre des hypothèses sur son utilisation en tant que variable de codage visuel, c'est-à-dire pour représenter graphiquement des valeurs qualitatives ou numériques, et mettre en évidence des propriétés de ressemblance, différence, proportionnalité ou ordonnancement entre ces valeurs. Notre démarche

consiste tout d'abord, dans le chapitre 2, à partir de la sémiologie graphique introduite par Bertin (1967), essentiellement destinée à des représentations graphiques 2D statiques, pour prendre en compte toutes les possibilités maintenant offertes par la visualisation d'informations par ordinateur. Ensuite dans le chapitre 3, nous exposons quelques résultats pertinents issus d'études faites sur la perception du mouvement, dans d'autres domaines que celui de la sémiologie graphique. Dans le chapitre 4, aux variables visuelles de Bertin que sont l'ensemble des variables rétinienne et les deux dimensions du plan (figure 1), nous ajoutons des hypothèses sur la définition d'une nouvelle variable : le mouvement. Cette variable temporelle est étudiée en combinaison avec les variables statiques précédemment citées, puis nous discutons dans le chapitre 5 des expérimentations à effectuer pour valider son utilisation dans le cas de la visualisation de graphes.

2 Contexte

2.1 La sémiologie graphique introduite par Bertin

La sémiologie graphique introduite par Bertin est immédiatement apparue comme un moyen très puissant de traitement visuel de l'information. Le but était de transmettre une information sous la forme d'une représentation graphique facilement lisible et mémorisable en faisant apparaître des corrélations visuelles ou des relations d'ordre entre les données. La « graphique » peut être vue comme un langage dont l'alphabet serait les signes graphiques élémentaires (points, ligne surfaces), dont le vocabulaire serait constitué par les attributs visuels, et dont la syntaxe correspondrait à l'édition de règles de combinaison liées à la perception visuelle. "La graphique est un système de signes qui permet de *transcrire les relations* de différence, d'ordre ou de proportionnalité existant *entre des données* qualitatives ou quantitatives" (Bonin, 1997).

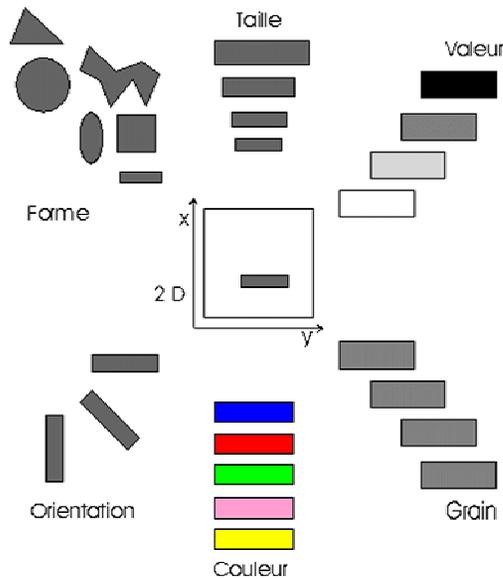


Figure 1. Les variables visuelles selon Bertin (1970)

Il existe apparemment une grande liberté pour traduire une composante en une variable visuelle, mais en réalité, certains choix s'imposent par leur efficacité. Par exemple, la forme ne peut pas traduire des rapports quantitatifs alors qu'elle peut exprimer parfaitement des différences. Bertin a ainsi défini un petit ensemble de 8 variables, les deux dimensions du plan et les variables rétinienne de taille, valeur, grain, couleur, orientation et forme. Ces variables visuelles ont des propriétés bien déterminées et sont transcrites selon trois formes d'implantation : ponctuelle, linéaire et zonale. Leurs combinaisons, en respectant les règles de la graphique, utilisent au mieux la perception visuelle pour traduire différentes relations. Chaque variable doit être qualifiée par une longueur et un niveau d'organisation. La longueur correspond au nombre de catégories que la variable permet d'identifier tandis que le niveau d'organisation représente les relations entre les catégories et entre les éléments des variables. Quatre propriétés sont définies : l'associativité désigne la capacité de regrouper ensemble toutes les catégories d'une variable, la sélectivité est la faculté d'isoler une catégorie, l'ordre permet de comparer plusieurs catégories entre elles, et enfin l'évaluation quantitative permet d'établir des rapports respectifs entre les catégories (figure 2). Est appelée image « la forme visuelle significative perceptible dans l'instant minimum de vision ». Selon Bertin, cette image admet au plus trois variables dans les diagrammes (deux dimensions du plan et une variable rétinienne), et uniquement deux variables dans le cas des réseaux (celle formant le réseau et une variable rétinienne).

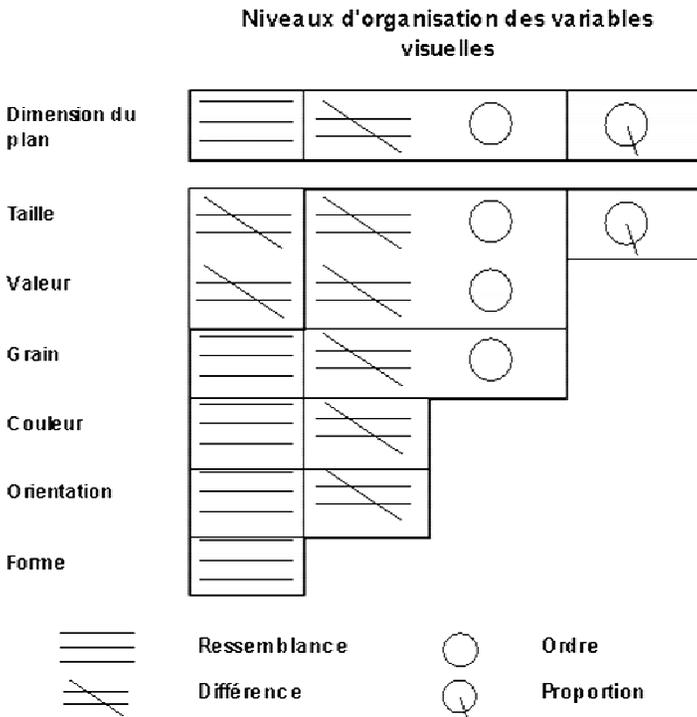


Figure 2. Niveaux d'organisation des variables visuelles selon Bertin

Dans son étude, Bertin s'est limité à ce qui est représentable sur une feuille de papier blanc. Il a donc volontairement exclu le mouvement. Il a même émis des réserves très fortes quant à son utilisation : « Si le mouvement apporte une variable de plus, celle-ci est écrasante, elle mobilise toute la perception et limite à l'extrême l'attention que l'on peut porter à la signification des autres variables. » (Bertin, 1967). A ceci, il est possible de répondre qu'il peut être utile dans certains cas temporaires d'écraser les autres variables. D'autre part, le mouvement possède des propriétés de perception très efficaces. D'ailleurs Bertin pressentait déjà d'autres possibilités offertes par l'informatique : « La graphique moderne, c'est l'image TRANSFORMABLE et reclassable [...] L'ordinateur y trouve son expression la plus complète et la plus puissante » (Bertin, 1967).

2.2 Extension aux variables dynamiques

Les travaux de Bertin ont été très largement utilisés dans le domaine de la cartographie et beaucoup d'extensions ont été proposées, notamment au sujet des variables dynamiques.

Une première tentative de synthèse de variables visuelles animées a été attribuée à Hayward (1984). Elle proposait d'ajouter de la dynamique sur la taille de l'espace représenté, sur les formes, sur les positions (en déplaçant un objet à travers la carte), sur le point de vue (pour mettre l'accent sur certains phénomènes), sur la distance de proximité vis-à-vis de la scène (pour reproduire un changement d'échelle en cartographie), et enfin, sur la scène (pour indiquer les transitions). A ceci il faut ajouter que la vitesse peut varier afin d'accentuer les taux de changement. Dibiasi *et al.* (1992) proposent 3 variables dynamiques, inspirées à la fois par Bertin et par des théories cinématographiques. Il s'agit de la durée pendant laquelle une représentation est donnée, du taux de changement m/d (m ampleur du changement en position, d durée de chaque scène) et de l'ordre des scènes. En 1994, 3 nouvelles variables ont été proposées par MacEachren (1994), à savoir le moment de représentation à partir duquel des changements apparaissent dans la présentation, la fréquence ou nombre d'états identifiables par unité de temps et la synchronisation.

Regardons de plus près dans quel cadre ont été définies ces variables dynamiques. Elles ne sont pas toutes utilisables de la même façon. Dans la plupart des exemples issus des travaux précédents, la variable temporelle représente un phénomène temporel, temps réel ou relatif aux données, et qui est retranscrit dans le temps de la représentation. D'autre part, la variable temporelle peut aussi être associée à des changements causés par des facteurs autres que le temps : la modélisation d'un changement des données ou la modélisation d'un changement de représentation des données. Ainsi ces variables n'ont, en grande partie, pas été développées dans la même optique que les variables statiques de Bertin. En effet, ces variables dynamiques ne se réfèrent pas aux attributs des données à représenter mais uniquement aux effets de changements spatiaux ou temporels. Ce n'est pas la dynamique qui porte l'information en elle-même mais toujours ses effets sur les différentes variables.

Dans la même optique, il nous paraît nécessaire de citer les travaux de l'IGN (Weger, 1999) qui définissent la dynamique par les différents modes de changements d'état d'un symbole en un temps donné. Intervient ici le déplacement qui peut être ponctuel (un mobile parcourant un axe), linéaire (progression d'une pollution fluviale) ou zonale (extension d'un incendie), ainsi que le clignotement d'un symbole et la mutation d'un graphisme. Il est intéressant de voir ici que cette variable est différenciée par sa fréquence et que à partir des facultés de perception et de mémorisation du phénomène, la longueur de cette variable a été fixée à trois. De même, elle est qualifiée d'ordonnée, d'associative et de sélective. Cette variable peut

aider à différencier les niveaux de lecture ainsi qu'à alléger l'image en jouant sur la substitution au lieu de la superposition de graphismes.

En dernier lieu nous évoquerons deux variables proposées par Marc Green (1998). La première est le mouvement décomposé en deux sous-variables, vitesse et direction, et la deuxième le clignotement décomposé en fréquence et phase. Ces hypothèses se basent à partir d'études menées sur la vision humaine mais n'ont malheureusement pas été testées empiriquement.

3 Contribution des autres domaines sur l'étude du mouvement

3.1 La perception du mouvement

C'est un domaine très vaste dont nous allons juste extraire quelques conclusions essentielles qui peuvent nous être utiles dans la visualisation d'informations. Tout d'abord d'un point de vue biologique et physiologique le mouvement est traité de la même manière que les autres variables. En effet la plupart des théories suggèrent que le traitement s'effectue en trois étapes : tout d'abord, la formation de l'image rétinale, puis la décomposition de cette image en ensemble de représentations spécialisées, et enfin le rassemblement des informations pour la perception d'objets. Il existe en effet des neurones sensibles à différents attributs comme la couleur, la forme, ou le mouvement, et seules les caractéristiques spatiales sont traitées par tous les neurones. Les conditions physiologiques existent donc pour pouvoir traiter le mouvement tout comme les autres variables graphiques statiques.

Une des premières théories qui s'est intéressée à la perception de motifs remonte au début du XX^{ème} siècle. Ces études sont toujours d'actualité car elles fournissent une description claire sur beaucoup de phénomènes perceptifs de base. En 1912, est donc apparue en Allemagne la théorie de la forme ou Gestaltthéorie. Elle venait pour pallier l'insuffisance reconnue de la théorie des éléments en proposant une théorie des ensembles, des structures et des formes : « Whole contains more information than the parts ». Plusieurs psychologues et chercheurs ont participé à la formulation de cette théorie. Parmi eux, M. Wertheimer, K. Koffka et W. Köler, suivis jusqu'à aujourd'hui par bien d'autres, notamment Oppenheimer, Gibson, Lorentz ou Arnheim. Sans vouloir faire l'histoire de ce mouvement et de toutes les écoles qui en découlent, nous citerons quelques principes qui nous intéressent. La loi de la Prägnanz établit que les yeux cherchent à voir la figure la plus simple et la plus stable. « [...] dans le conflit des formes possibles, le groupement ou la disjonction se fait dans le sens de la réalisation d'une forme privilégiée. Les formes privilégiées sont régulières, simples, symétriques. La forme qui est perçue est la meilleure possible (loi de la bonne forme). » (Guillaume, 1942). Cette théorie définit en effet les six principes suivant qui ont une influence sur la façon dont nous percevons des informations visuelles :

- Proximité : les éléments proches sont susceptibles d'être facilement regroupés ensemble pour former une figure.
- Similarité : les éléments qui ont un attribut similaire sont susceptibles d'être regroupés.
- Continuité : l'œil cherche à voir un contour comme un objet continu.
- Fermeture : l'œil tend à percevoir des figures complètes, fermées, même si il manque des lignes de contour.
- Zone : quand deux éléments se superposent, le plus petit paraît être devant le plus grand.
- Symétrie : l'œil préfère les figures ayant une plus grande symétrie possible.

Cette théorie s'applique aussi bien à la perception statique qu'à la perception dynamique. Le principe du « common fate », observant que des éléments dotés d'un mouvement commun auront tendance à être regroupés, est aussi reconnu. Par exemple des points en mouvement qui auront tendance à bouger ou à clignoter en phase seront perçus comme un ensemble : il y aura association des points affectés d'un même mouvement, le groupe présentant une forte « prégnance ». La répartition et la densité des points jouent aussi un rôle quant à l'identification du groupe : « Dans un ensemble structuré, la loi du tout détermine les parties ; celles-ci tendent à se compléter d'une certaine façon et captent les éléments du champ susceptibles de constituer ce complément. Cette tendance est plus marquée quand les éléments appartenant à cette structure sont plus nombreux [...] » (Guillaume, 1942).

D'autres théories se sont aussi intéressées au mouvement comme la perception préattentive. Le système visuel humain « bas niveau » possède une part de traitement automatique qui permet d'identifier très rapidement des propriétés visuelles graphiques. Ces traitements sont rapides, un seul coup d'oeil, ne demande pas de conscience d'esprit, pas d'effort, ne perturbent pas les autres tâches et sont sûrs. Ils sont dits préattentifs car ils précèdent la phase d'attention. Une visualisation préattentive est effectuée en moins de 250 ms et le temps mis pour accomplir la tâche est indépendant du nombre d'éléments affichés. Plusieurs théories ont essayé d'expliquer comment ces processus préattentifs fonctionnent : «feature integration theory, texton theory, similarity theory, guided search theory ». Christopher Healey (1992) en a fait une très bonne présentation. Beaucoup de caractéristiques visuelles peuvent être perçues préattentivement : orientation de ligne, longueur, épaisseur, taille, courbure, cardinalité, terminaison, intersection, inclusion, teinte, clignotement, direction de mouvement, profondeur stéréoscopique, indices 3D, direction de l'éclairage... Il faut cependant noter que les caractéristiques préattentives interfèrent entre elles, par exemple la somme couleur plus forme n'est pas préattentive. Plusieurs tâches peuvent être traitées de manière préattentive : la détection d'une cible ayant un critère visuel unique au milieu d'un champ de distracteurs (est-ce qu'il y a quelque chose ici ?), la détection de frontière entre deux groupes d'éléments ayant chacun une propriété visuelle commune (peut-on regrouper les éléments ?), compter ou estimer le nombre d'éléments ayant une certaine caractéristique visuelle (combien d'éléments d'un certain type sont présents ?).

Voici en résumé quelques résultats précis issus d'expériences en psychologie expérimentale. Tout d'abord sur le problème de la détection de mouvement, il existe des conditions très précises. Au sujet de la fréquence des expériences ont été effectuées sur la perception du clignotement d'un flash. Plusieurs conclusions sont à retenir. La fréquence doit varier à partir de 2 à 5% pour percevoir une différence (Brown, 1965). Le temps d'identification s'allonge si la vitesse de la cible diminue ou si elle part en périphérie de la zone de vision (Tynan et Sekuler, 1982). Il faut toutefois remarquer que le temps de réponse reste dans tous les cas très élevé pour un clignotement, de 200 à 350 millisecondes en périphérie ou de 200 à 310 millisecondes au centre du focus. Une vitesse de départ plus élevée donne de meilleurs résultats pour détecter un changement de vitesse (Hohnsbein et Mateeff, 1998). Au sujet de la vitesse, pour pouvoir détecter un mouvement, des mesures (Tayama, 2000) montrent qu'un objet doit au moins traverser un minarc (1/60^{ième} de degré). Cependant, la perception du mouvement dépend du contexte : l'œil humain est bien meilleur pour détecter un mouvement relatif que pour détecter un

mouvement absolu. Un tout petit mouvement peut devenir décelable s'il est placé dans un environnement présentant d'autres mouvements bougeant en anti-phase.

Selon la Gestaltheorie, l'œil humain a de très bonnes capacités pour détecter un ensemble de mouvements cohérents. Nakayama et Silverman (1986) ont été les premiers à démontrer que le mouvement était préattentif et qu'il pouvait être utilisé pour séparer des éléments en groupes cohérents. Trouver un rond rouge parmi des carrés rouges et des ronds bleus implique une recherche « en série » coûteuse en temps. Si les éléments rouges sont animés d'un mouvement qui monte et les éléments bleus d'un mouvement qui descend, la cible devient immédiatement visible. En effet, le mouvement permet au système visuel humain de séparer automatiquement deux groupes, et il reste alors à chercher des ronds rouges parmi des carrés rouges, ce qui est une recherche rapide. Le mouvement produit un effet que l'on peut qualifier de « pop-out ». Ware et Limoges (1994) ont démontré que des objets en mouvement pouvaient être cherchés en parallèle même si les cibles avaient des directions et des vitesses angulaires différentes. Enfin, Andersen (1989) a démontré qu'un observateur pouvait détecter simultanément 3 groupes d'objets, chaque groupe se déplaçant à direction et vitesse constante. La capacité d'association de points se déplaçant avec les mêmes caractéristiques de direction et de vitesse peut s'effectuer même si le signal ne représente que 5% des points (Blake et Aiba, 1998). Néanmoins, si les performances d'analyse visuelle ne dépendent pas de la direction, elles peuvent varier avec la taille d'affichage, la durée d'exposition, ou une période éventuelle d'adaptation. Un dernier percept fondamental est à citer : la transparence. Le système visuel peut percevoir plusieurs mouvements simultanément et isoler l'un d'entre eux. C'est ce qu'on appelle la "transparence des mouvements ». Gibson *et al.* (1959) ont rapporté que des observateurs pouvaient détecter deux plans qui se superposent dans un affichage, les deux plans se mouvant à des vitesses différentes. Puis, Andersen (1989) a démontré qu'il était possible de détecter 3 plans se mouvant à différentes vitesses pendant 2 secondes. Enfin, Mulligan (1992) expose la perception de 5 plans bougeant simultanément sur une durée de 250 ms. La durée de perception dépend du type de mouvement : elle peut être rapide pour la translation mais doit dépasser 85 ms et être accompagnée de bruit pour un changement d'échelle ou une rotation. En général le phénomène de transparence apparaît pour cibles qui bougent en phase dans une direction et une vitesse données.

D'autres études ont d'ailleurs mis en évidence certaines limites. Ainsi il est plus difficile de trouver une cible statique au milieu de cibles en mouvements que le contraire (Dick, 1989). De même, parmi des éléments en mouvement, il est plus facile de trouver les cibles qui vont vite que celles qui vont lentement (Ivry, 1992). Si les éléments n'oscillent pas en phase la recherche n'est plus préattentive (Driver *et al.*, 1992). D'autre part la combinaison de mouvements peut aussi ne pas fonctionner (Braddick et Holliday, 1987). Ainsi pour être préattentif un mouvement ne doit pas partager les mêmes mouvements de base que les distracteurs. D'autre part, Treisman et Gormican (1991) ont démontré que le temps de recherche de cibles animées d'un mouvement au milieu de distracteurs animés de plusieurs mouvements dépendait de leurs taux de ressemblance respectifs. Dans un premier temps, la recherche est efficace si les mouvements des cibles sont suffisamment différents de ceux des distracteurs. Mais, si les mouvements des distracteurs sont assez homogènes alors la différence entre cibles et distracteurs a besoin d'être moins importante pour atteindre un même niveau de perception.

Par ailleurs, l'œil humain sait non seulement détecter si il y a ou non mouvement mais il peut aussi déterminer ses caractéristiques essentielles comme la

direction, la vitesse ou la cohérence. Tandis que la détection de mouvements est isotropique, la discrimination de direction est anisotropique. Ses résultats sont meilleurs quand les directions sont proches des directions cardinales (Green *et al.*, 1998). La discrimination de seuil de vitesse, typiquement représentée par des fractions de Weber (DV/V) a été fixée en règle générale entre 0.04 et 0.08 pour différents types de mouvement (Sekuler *et al.*, 2002). Williams et Sekuler (1984) reprennent l'expérience des points qui bougent dans des directions distribuées entre 0 et 180 degrés, et constatent que l'observateur perçoit un champ de mouvement qui se déplace dans le sens de la direction moyenne bien que les mouvements individuels restent aussi visibles. Cette expérience montre que la perception du flot global et du mouvement de cibles individuelles peut s'effectuer simultanément.

La discrimination de la vitesse et de l'accélération est hautement dépendante du contexte, à savoir la fréquence d'affichage des objets, leur contraste, et leur position dans l'image. En effet des stimuli affichés pendant de courtes périodes paraîtront avoir une vitesse supérieure à ceux présentés pendant des périodes plus longues. De même, un mouvement à basse fréquence paraîtra plus lent que le même à haute fréquence ; un contraste plus bas fera apparaître le mouvement plus lent ; un objet à la périphérie paraîtra plus lent qu'un objet au centre... Ces relations de dépendance montrent combien il est délicat d'estimer ces caractéristiques et, dans le cas de notions quantitatives, pourront influencer sur l'utilisation du mouvement dans le contexte de la visualisation.

3.2 Le mouvement en informatique graphique

Le mouvement a déjà été étudié en tant que codage abstrait en informatique graphique. Dans sa thèse Bartram (2001) a mené des études empiriques sur l'utilisation des propriétés perceptuelles du mouvement dans la visualisation d'informations, notamment sur la signalisation (manière dont une information peut être communiquée à l'utilisateur) et sur l'intégration (manière d'associer diverses informations issues de différentes sources d'affichage). Les résultats ont montré que même des mouvements relativement lents étaient très efficaces pour résoudre les deux problèmes et dépassaient les performances du codage par la couleur ou les formes, tout spécialement en périphérie d'affichage. Les mouvements de clignotement, surtout lents, ont par ailleurs été prouvés comme étant peu distrayants contrairement aux mouvements de déplacement qui perturbent plus l'utilisateur dans sa tâche principale. Pour l'étude sur l'intégration, plusieurs mouvements oscillatoires ont été testés : circulaire (décrit un rayon de 20 pixels), linéaire (oscille sur une longueur de 20 pixels dans une direction donnée), zoom (100% à 200% de la taille). Des trois mouvements, le mouvement circulaire est visuellement le plus dominant, de même la variation de la forme est plus efficace que celle de la direction. Pour les mouvements linéaires, la distinction entre des directions présentant un angle de séparation situé entre 45 et 135 degrés est acceptable, mais ne l'est plus pour 180 degrés. En effet, ces mouvements s'apparentent alors à une opposition de phase, élément délicat à manier. Au cours de ces expériences, il a aussi été démontré qu'en général une perception de 2 secondes suffisait, la perception de regroupement étant persistante.

Une autre étude sur la visualisation (Bartram et Ware, 2002) a prouvé que le mouvement était un bon candidat pour faire du filtrage, ou de la surimpression d'informations sur la structure existante pour mettre en évidence des relations ou des points saillants. En effet le mouvement paraît spécialement utile pour la surimpression car il peut être superposé sur des caractéristiques existantes comme la couleur, la forme et la position. L'effet de regroupement « pop-out » s'applique au filtrage en permettant aux autres caractéristiques statiques de rester moins visibles.

La bonne performance des mouvements circulaires en fait de lui un bon candidat pour le filtrage. D'autre part, il a été noté que la fréquence et la phase étaient mal perçues au cours de ces expérimentations. Le mouvement a aussi été étudié dans le cadre de l'amélioration de la lisibilité de graphe (Ware et Bobrow, 2004). Dans tous les tests présentés, les nœuds mis en évidence par un mouvement sont plus facilement repérables que ceux mis en évidence par une caractéristique statique. Ces tests ont aussi permis de confirmer que le mouvement pouvait permettre d'effectuer des recherches visuelles préattentives conjonctives dans les cas suivants : recherche conjonctive d'un mouvement et d'une forme simple, ainsi que la recherche conjonctive d'un mouvement et d'une couleur.

Cet état de l'art se limite à positionner le mouvement en tant que variable de codage, d'autres éléments seront cependant à prendre en compte dans de futures études. Notamment le mouvement peut transformer une tâche cognitive en une activité perceptive par un rôle de lien entre vues (Robertson *et al.*, 1999), ou introduire une notion de causalité.

4 Le mouvement en tant que nouvelle variable graphique au sens de Bertin

4.1 Définition de la variable mouvement

Le paragraphe précédent nous suggère que le mouvement possède de nombreuses caractéristiques utilisables pour l'association et la discrimination visuelle, c'est pourquoi nous le proposons comme nouvelle variable graphique associée à la théorie de Bertin (Saulnier, 2005). Nous considérons ici le terme mouvement avec un sens très large. C'est le fait, pour une entité graphique de subir des transformations, de se déplacer ou de se transformer, dans le temps par rapport à un repère fixe. Ces transformations peuvent ainsi être appliquées à la position, à la géométrie, à la texture, à la couleur, ou à la lumière de l'entité. Nous proposons de décomposer la variable mouvement en 4 sous-variables : la trajectoire, la vitesse/fréquence, la phase et la durée. Le mouvement ne peut être perçu qu'appliqué à une variable statique. Aussi la trajectoire se décrit-elle dans le domaine de cette variable. Ainsi pour la position, la trajectoire est une courbe décrite par un point dans le plan, et pour les couleurs, la trajectoire prendra la forme d'une fonction dans l'espace des couleurs. Une trajectoire peut être ouverte ou fermée conduisant à des classes de mouvements très différents au niveau perceptif à savoir les mouvements continus ou oscillatoires. Nous noterons que dans le cas du mouvement continu, la durée maximale est définie par la trajectoire et la vitesse. Si les deux sous-variables vitesse/fréquence et début/phase font généralement appel à un vocabulaire différent dans le cas continu ou oscillatoire, elles n'en caractérisent pas moins des phénomènes semblables : une fonction de parcours temporel de la trajectoire et un temps de début.

D'un point de vue perceptif, cette variable donne des effets différents en fonction de la variable statique à laquelle elle s'applique :

- position : effet de déplacement sur une trajectoire ouverte, effet d'oscillation sur une trajectoire fermée
- taille : effet d'homothétie
- valeur : effet de clignotement ou d'interpolation
- grain : effet de clignotement
- couleur : effet de clignotement ou d'interpolation
- orientation : effet de rotation sur soi-même
- forme : effet de clignotement ou d'interpolation

La variation temporelle génère deux classes de mouvement, les mouvements continus et oscillatoires, qui ont des propriétés visuelles et perceptives très différentes et qui n'ont donc pas les mêmes applications potentielles dans les systèmes de visualisation. Selon Bartram (2001), les mouvements continus nécessitent une détection et un suivi pour être utilisés, ils semblent donc plus perturbants et moins performants que les mouvements oscillatoires pour réaliser une fonction de codage. Cette deuxième catégorie regroupe tous les mouvements oscillatoires ancrés.

Nous allons tenter de donner des conditions d'utilisation de cette variable par rapport aux propriétés visuelles définies par Bertin en s'appuyant sur les expériences décrites précédemment. En effet, nous pouvons utiliser les résultats précédents car la dichotomie entre perception préattentive et attentive est tout à fait analogue à la distinction que fait Bertin entre la perception « immédiate », nécessaire pour les variables graphiques, et « signe par signe ».

4.2 Qualification *a priori* des variables

Nous allons émettre des hypothèses sur l'impact de la variation de chaque sous-variable du mouvement, les trois autres sous-variables étant momentanément fixes.

La longueur de la trajectoire, quand elle est appliquée à la position, dépendra du nombre de catégories de déplacement qui peuvent exister. Nous n'avons vu que des expériences avec 3 déplacements différents, mais ce chiffre est sûrement à réviser à l'aide d'études plus exhaustives. Quand la trajectoire est appliquée aux autres variables, sa longueur dépend du nombre de fonctions visuellement distinctes qui peuvent être décrites dans le domaine de la variable. Typiquement deux fonctions dans l'espace des couleurs qui partagent les mêmes valeurs seront difficilement distinguables. Au contraire, deux fonctions qui évoluent respectivement du vert au rouge et du bleu au jaune pourront être différenciées. Il est clair qu'une trajectoire passant par toutes les valeurs d'une variable statique ne sera plus discriminante. Dans ce cadre, les trajectoires sont contraintes par le nombre de combinaisons présentes dans le domaine de la variable statique et par le phénomène de mémorisation. Néanmoins, il serait intéressant d'expérimenter la perception de trajectoires croisées, notamment, la possibilité de faire émerger des notions de groupes et de sous-groupes avec des variations de valeurs binaires croisées. Comme le montrent les travaux précédents, le cas de la phase est délicat : il semble donc raisonnable de limiter sa longueur à 2, soit phase et opposition de phase. Selon Green (1998), la longueur de la fréquence doit aussi être assez courte. La durée ne semble pas être du domaine du préattentif. Néanmoins, combinée avec la phase, elle peut conduire à une animation temporelle mettant en évidence différents groupes.

Si nous commentons ces nouvelles variables en regard des propriétés de niveau d'organisation définies par Bertin, nous pouvons émettre quelques hypothèses (Tableau 1) qui restent néanmoins très incomplètes. Le principe du « common fate », tendance à bouger ou à clignoter ensemble, nous indique que toutes les sous-variables du mouvement sont indubitablement sélectives. En effet, l'œil humain interprète les éléments qui bougent de manière identique comme un seul objet, et il est alors possible de détecter cet objet parmi les autres. Cependant, dans le cas de la trajectoire, les propriétés dépendent de la variable statique choisie. Il reste donc à vérifier si la trajectoire appliquée à la forme est vraiment sélective. De même, très probablement la variable trajectoire appliquée à la valeur et la taille, variables statiques non associatives, n'aura pas de propriété d'associativité. En revanche, en se

basant sur les expérimentations de Ware, il semblerait que la trajectoire appliquée à la position, telle que des oscillations et des mouvements circulaires, soit associative. L'associativité dans le cas de la couleur, la forme et le grain semble prometteuse mais devra faire l'objet d'expérimentations. La phase n'est évidemment pas associative, tout comme la fréquence est très improbableement associative. Enfin en ce qui concerne les propriétés d'ordre et de quantité, comme pour les cas précédents, des résultats relatifs à la trajectoire peuvent encore être déduits des variables statiques. Il semble aussi possible que la fréquence soit ordonnée mais cela reste à expérimenter.

Trajectoire	Associative	Sélective	Ordonnée	Quantitative
Position	OUI (selon Ware)	OUI (selon le principe du common fate)	A expérimenter	A expérimenter
Taille	NON Variables statiques			
Valeur				
Grain	Oui ? A expérimenter		NON Variables statiques	NON Variables statiques
Couleur				
Orientation				
Forme		Non ? Variables statiques		

Tableau 1. Niveaux d'organisation a priori de la variable trajectoire

Remarquons que le mouvement étant dépendant du contexte, la variation simultanée de plusieurs sous-variables peut conduire à troubler la perception des valeurs prises par les variables. Par exemple, différentes valeurs de la phase peuvent être masquées par la fréquence. Ainsi, si la fréquence et la phase doivent être utilisées indépendamment, en revanche d'autres combinaisons peuvent fonctionner. Comme le confirme une expérience de Ware et Limoges (1994), la trajectoire appliquée à la position peut être combinée à la trajectoire appliquée à la taille pour donner accès à un plus grand nombre de catégories de valeur. Notons enfin, que pour être utilisées dans une image, les variables mouvement doivent être choisies de manière à ne pas entrer en conflit avec les variables statiques présentes dans l'image.

5 Cadre d'expérimentation

5.1 Mouvement en tant que variable pure

Bertin a formulé une théorie de la perception graphique qui n'est pas basée sur des observations empiriques systématiques mais qui est néanmoins scientifiquement formulée. Sa théorie a été établie à partir de l'observation d'un grand nombre de cartes et graphiques. Son livre est ponctué d'exemples. Quelques tests préconisés par Bertin concernent des variables pures c'est-à-dire toute autre variation que la variable considérée étant exclue. Par exemple, la variation de couleur est considérée

dans une seule valeur (luminosité), toute autre variation étant exclue. Il étudie les variables pures car il veut connaître les caractéristiques des variables avant d'étudier leurs combinaisons. Bertin assure que lorsque l'on combine deux variables, le niveau d'organisation de la variable la plus élevée est gardé. Ce postulat, ayant été contesté pour certaines variables statiques, sera toutefois à manier avec circonspection. Les éléments à tester sont les quatre qualités informatives que peuvent posséder les éléments d'une même variable. Ces propriétés s'entendent en vision spontanée, sans référence nécessaire à une légende.

La perception associative

La perception associative est utilisée quand on « cherche à égaliser une variation, à regrouper des correspondances toutes catégories de cette variation confondues » (Bertin, 1967). Pour extraire une variation, le meilleur test suggéré par Bertin consiste à afficher une série de points non différenciés et formant une plage homogène. Cette variable est alors associative si l'œil peut reconstruire spontanément l'homogénéité de la plage malgré une variation visuelle donnée. Ainsi une variable visuelle associative ne doit pas faire varier la visibilité des signes. Bertin donne des exemples de tests de variation de valeurs de ses variables graphiques appliquée sur un quadrillage de points.

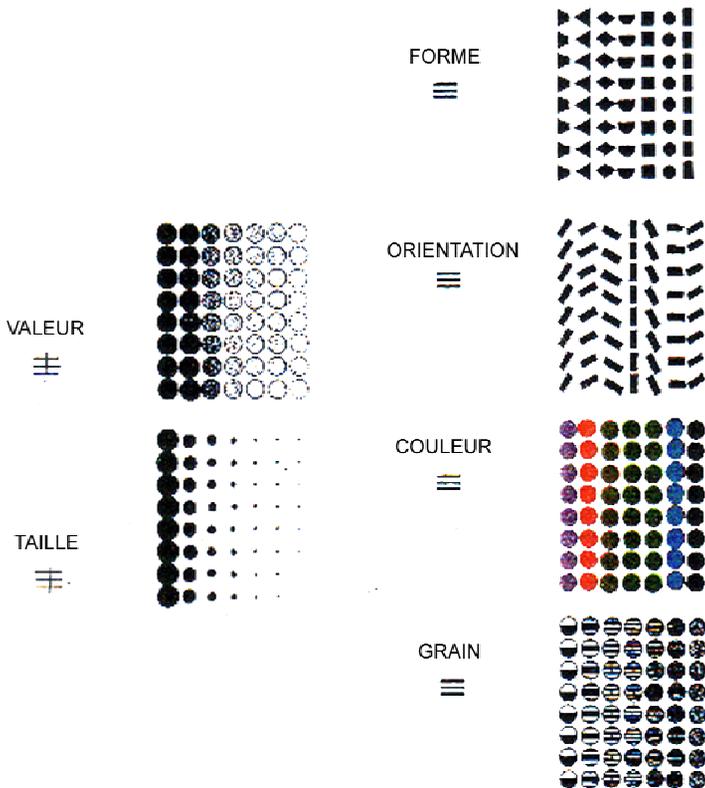


Figure 3. Test de variation associative — et dissociative - - selon Bertin (1970)

Les tests de la figure 3 montrent que la taille et la valeur sont dissociatives car certains signes sont moins visibles que d'autres, ils apparaissent avec des puissances différentes, tandis que toutes les autres variables sont associatives.

Il est possible de reproduire les mêmes types de tests sur un quadrillage pour regarder les effets de la variable mouvement en étudiant des mouvements oscillatoires ancrés de petites tailles. Nous n'avons pas procédé à des expérimentations avec un panel d'utilisateurs mais nous avons néanmoins déjà mis en place quelques tests préliminaires, qui ont été montrés à un petit groupe de cinq utilisateurs habitués à lire des graphes. Il faudra ensuite poursuivre ces tests avec un panel diversifié de personnes, en suivant un protocole d'expérimentation clairement défini, puis les compléter pour étudier les autres implémentations possibles du mouvement ainsi que leurs conditions d'utilisation. Citons les quelques exemples préliminaires déjà mis en place :

- Trajectoire appliquée sur la variable statique *position* créant des oscillations de différentes longueurs pour chaque colonne de points. Sur l'écran le carré se déforme en losange, chaque point gardant cependant la même visibilité. Comme prévu, ce cas paraît associatif.
- Trajectoire appliquée sur la variable statique *taille* créant des zooms différents sur chaque colonne de points. Dans ce cas, la visibilité d'un point peut varier au cours du temps. Cependant, il n'y aura pas d'associativité si la visibilité n'est pas synchrone. Il en est de même pour la trajectoire appliquée sur la *valeur*.
- Trajectoire appliquée sur la *couleur*, chaque colonne de points ayant une séquence de couleurs différentes avec une valeur (luminosité) constante. Ce mouvement se matérialise par une succession de changements de couleurs dans le temps. Le carré de points reste toujours aussi visible si les points changent de couleurs. L'exemple mis en place apparaît ainsi associatif.
- Fréquence implémentée par l'apparition et la disparition de points à des temps différents. Afin de voir le carré par intermittence, il faut que toutes les fréquences soient sous-échantillonnées par rapport à une fréquence de base. Il faut alors vérifier si une perception par intermittence suffit pour voir l'association des points. Ce cas est donc délicat à manier et reste à étudier.
- Durée sur le même test de clignotement de points, le clignotement de chaque colonne s'arrêtant à des temps différents. Ce cas ne peut pas être associatif car il n'est pas possible de voir toutes les variations de la variable en même temps.

La perception sélective

La perception sélective doit permettre à l'utilisateur de percevoir spontanément une seule catégorie d'une variable. L'œil doit alors isoler tous les éléments de cette catégorie, en faisant abstraction de tous les autres signes. Le test préconisé par Bertin consiste à reconnaître l'image formée par la catégorie recherchée (figure 4).

Nous avons reproduit quelques tests de base à partir de ce modèle. Des résultats préliminaires satisfaisants ont été obtenus pour des tâches de perception sélective sur les mouvements suivants faisant intervenir uniquement deux catégories :

- petites oscillations linéaires de taille ou directions différentes,
- mouvements oscillatoires, linéaires et circulaires,
- zooms de tailles différentes,

- changement de couleurs (rouge-orange, vert-bleu),
- clignotement de points avec deux fréquences différentes.

Il faut poursuivre ces expérimentations pour étudier d'autres cas et déterminer plus précisément les conditions d'utilisation et les longueurs des variables. En effet, les exemples cités ont pour longueur de variables 2, mais la longueur maximum reste à déterminer. Toutefois ce type d'études est délicat à mener car souvent, la longueur d'une variable n'est pas indépendante des autres variables, par exemple, pour la couleur, la longueur dépend de la valeur (plus la luminosité est basse moins il y a de couleurs discriminantes), de la dimension des tâches et de leur association spatiale....

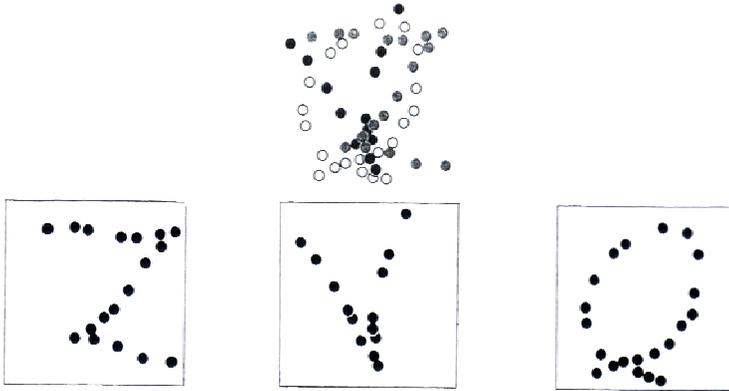


Figure 4. Perception sélective : image et détails des 3 catégories recherchées

La perception ordonnée

La perception ordonnée est utilisée pour comparer deux ou plusieurs ordres. Selon Bertin pour savoir si une variable est ordonnée, il ne faut pas avoir à consulter la légende. Le meilleur test est donc de demander au lecteur de rétablir dans chaque variable l'ordre universel des signes (plus grand, moins grand que). En résultats préliminaires la taille des oscillations linéaires, la variation de zoom ou de valeur, et la fréquence apparaissent comme ordonnées.

La perception quantitative

Le plus haut niveau d'organisation est quantitatif. Il permet d'extraire directement des ratios (deux fois plus grand que) sans avoir recours à la légende. Le test recommandé par Bertin est de demander au lecteur la valeur du signe supérieur lorsqu'il attribue 1 au signe inférieur. Ceci demande une approximation correcte mais pas une mesure précise. Toujours en résultats préliminaires, la taille des oscillations linéaires, la variation de zoom, et la fréquence apparaissent comme quantitatives.

5.2 Mouvement dans les graphes

Description des graphes INA

Les graphes sont des structures de réseaux qui contiennent deux types d'éléments : des entités, appelés nœuds, et des relations entre ces entités appelées arêtes. Les graphes constituent naturellement une bonne modélisation des réseaux d'échange (routier, ferroviaire, aérien) et de communication (téléphone, Internet). Mais la réalité offre de nombreux exemples de réseaux « cachés » dont la modélisation sous forme de graphe permet l'analyse en terme d'organisation globale

ou locale. Disposant de la collection complète des journaux télévisés, l'INA se trouve dans une position privilégiée pour élaborer des outils innovants d'analyse de l'information télévisuelle. De plus, les données documentaires associées aux programmes constituent une excellente base pour la réalisation d'une cartographie de l'information. Dans cette utilisation des graphes, la connectivité des termes permet une interprétation qualitative de l'information.

L'idée, ici, est de représenter les termes indexant les sujets télévisuels par des nœuds et la cooccurrence des termes au sein d'un même sujet par une arête. Ainsi, la carte apparaît comme une carte du ciel, dont les étoiles les plus visibles (en rouge) correspondraient aux thèmes les plus traités, et les constellations les plus importantes aux corrélations de descripteurs les plus fréquentes. Le graphe ci-après (figure 5) est construit de la façon suivante : chaque sujet télévisuel est indexé par des mots clefs représentés par les nœuds du graphe et deux mots clefs sont reliés par une arête s'ils décrivent un même sujet. On calcule, pour chaque nœud une occurrence, qui correspond au nombre de sujets indexés par ce mot ou couple de mots. L'occurrence est associée à un dégradé de couleur du vert au rouge, le rouge marquant les occurrences les plus grandes. La couleur a été choisie pour coder une valeur numérique plutôt que la taille qui pose problème quand les éléments trop petits disparaissent. La couleur détient plusieurs propriétés intéressantes. Du point de vue qualitatif, elle possède des couleurs bien séparables. Bertin assure qu'il est possible de définir jusqu'à 7 couleurs en mode sélectif, tandis que Healey (1996) a fait des tests de préattentivité qui montrent que 5 couleurs peuvent être perçues en même temps de manière préattentive et, pour une valeur cible, il peut y avoir jusqu'à 9 couleurs. La couleur peut aussi être utilisée en mode séquentiel pour ses propriétés ordonnées. Dans notre exemple, nous avons utilisé une interpolation linéaire allant du vert pur au rouge pur dans l'échelle LUV. On voit ainsi apparaître 2 classes de manière préattentive, les rouges purs et les verts purs. Ce qui nous intéresse ici est en effet de mettre en évidence des « constellations » rouges qui font émerger les grandes tendances de l'information télévisuelle. Remarquons que l'échelle utilisée est linéaire du point de vue physique mais pas du point de vue perceptif. Pour obtenir un codage qui permette d'évaluer les distances entre les couleurs d'un point de vue perceptif, il faut mieux alors utiliser les échelles de couleurs de Brewer (1994). D'autres prototypes développés à l'INA (Thièvre, 2006) utilisent ces échelles ou combinent plusieurs variables comme la taille et la couleur. Ils ne sont pas présentés dans cet article car, dans le cadre d'une première validation de l'apport du mouvement, nous nous limitons uniquement aux graphes les plus simples afin de faire interférer le moins de variables possible.

La difficulté est de créer des représentations facilement lisibles et analysables. La particularité du modèle de graphe est de faire émerger des groupes de termes plus utilisés ensemble qu'avec le reste des termes. Notre hypothèse est que ces groupes correspondent à des objets intéressants à analyser, qui peuvent se rapporter, par exemple, à un événement spécifique (la tempête de l'an 2000), une catégorie d'événements (scandales politiques), ou une thématique (santé publique et alimentation). Nous avons conçu des outils pour dessiner et filtrer ces graphes de manière à faire émerger des relations de proximité qui correspondent à ces groupes. Le positionnement du graphe est réalisé dans un premier temps à partir d'algorithmes inspirés de la physique et simulant différents systèmes de forces. De manière générale, ces graphes sont grands (10000 nœuds, 40000 arêtes). Un des aspects importants de nos recherches est donc de concevoir des outils de filtrage : il s'agit d'éliminer temporairement certains nœuds ou arêtes bien choisis afin de faire émerger les structures intéressantes du graphe (Viaud *et al.*, 2006).

La figure 5 représente les corrélations des termes indexant les JT d'ARTE sur l'année 2000. Les mots clefs les plus importants en terme d'occurrence sont : *attentat, île, gouvernement, prise d'otage, négociation, violence, scandales fiscaux*. Ces cartographies de l'information permettent d'obtenir très rapidement des vues globales et locales de sujets d'actualités traités en intégrant des données quantitatives et qualitatives. Elles font émerger automatiquement les thèmes, types d'événements ou événements les plus traités de l'information et leur contexte. Elles peuvent être utilisées comme point d'entrée pour naviguer, effectuer des analyses sur les média, faire des comparaisons entre chaînes ou périodes de temps, assurer l'exhaustivité du traitement d'un sujet. Cet outil constitue une approche complémentaire pour l'analyse des média télévisuels. Ce prototype est générique et permet de traiter sous cette forme n'importe quelle donnée possédant une structure de graphe. Il est donc possible de visualiser aussi les réseaux sociaux ou des portions du réseau internet.

Taxonomie des tâches utilisateurs

Pour être performants, les graphes doivent offrir un certain nombre de fonctionnalités. Ce paragraphe propose une liste non exhaustive mais représentative des tâches utilisateurs :

- Visualiser plusieurs attributs sur les nœuds ou les arêtes : sur la figure 5, l'occurrence des nœuds est codée par la couleur, mais à chaque terme sont associés plusieurs attributs numériques ou nominaux dépendant des données (durée, thématique majoritaire...) ou de la topologie du graphe (degré du nœud, indice de centralité...) qu'il serait souhaitable de visualiser en plus des caractéristiques visuelles déjà mises en œuvre.
- Visualiser les sommets ou arêtes dans le k-voisinage d'un nœud : identifier les voisins d'un nœud, éventuellement en distinguant différents types de voisins (selon la distance, entrant et sortant), et signaler des voisins qui ne seraient pas affichés sur la partie du graphe de la fenêtre courante.
- Visualiser le plus court chemin entre deux nœuds ou deux groupes de nœuds. Dans le cas des arêtes orientées, le sens de propagation est aussi une donnée à prendre en compte dans la visualisation du chemin.
- Visualiser un arbre : superposer un arbre couvrant peut aider à comprendre l'organisation d'un graphe ; par exemple, proposer une vue centrée sur un focus qui serait la racine de l'arbre et identifier la distance de tous les autres nœuds par rapport à la racine.
- Comprendre le positionnement du graphe : donner des éléments visuels pour comprendre le placement du graphe, dans la construction du graphe indiquer des points encore sous tension n'ayant pas trouvé leur équilibre ou la tension des arêtes sur le modèle de forces appliqué sur le graphe.

Tests et résultats préliminaires

Les tests pour valider l'utilisation du mouvement sur une représentation graphique ne représentent qu'une petite partie de l'ensemble complexe des processus que constitue une tâche utilisateur. Ainsi, montrer le résultat d'une requête type, comme, par exemple, citer les trois termes de plus forte occurrence liés à la fois aux termes *épidémie* et *maladie*, dépasse l'étude du phénomène de perception du mouvement. En effet, sa résolution nécessite trois étapes. La première concerne « l'identification externe », l'utilisateur détermine quelles composantes sont représentées dans la visualisation. La deuxième étape est « l'identification interne » où l'utilisateur établit les correspondances entre les variables graphiques et les composantes (ici occurrence des termes codée par la couleur). En dernier lieu, l'utilisateur perçoit les relations entre les composantes

(quel terme correspond à une occurrence plus forte). Dans cette étude, nous ne nous intéressons pas aux étapes d'identification externe et interne car elles font appel à des processus cognitifs de niveaux supérieurs. Nous ne nous intéressons donc qu'aux relations entre composantes. Ainsi, nous cherchons dans un graphe des informations relationnelles du type : trouver toutes les variables graphiques mouvement, déterminer combien de groupes différents sont codés par le mouvement, trouver un groupe parmi d'autres, ordonner ou quantifier les groupes... Comme travail préliminaire, nous avons implémenté quatre situations différentes pour tester des mouvements d'oscillations linéaires (de taille ou angle différent), de zoom (de coefficient différent), de clignotement (de fréquence différente) et des mouvements mixtes (oscillation linéaire, circulaire et zoom). Chaque situation possède trois catégories. Dans tous les cas, la fenêtre d'affichage est de 20 sur 23 cm, la résolution écran est de 1024*768 pixels et la tâche est de déterminer le nombre de groupes en mouvement. Ces tests préliminaires ont été effectués auprès du même groupe d'utilisateurs qui ont testé les variables pures.

Dans le premier cas, il y a 560 nœuds carrés de 2mm de coté, qui sont colorés avec une palette allant du rouge au vert. Les nœuds sont reliés par des arêtes. Nous avons choisi de coder trois petits groupes distants : trois nœuds en bas alignés en arc de cercle, trois nœuds en haut à gauche alignés selon une droite et trois nœuds alignés au centre, entourés de beaucoup d'autres points. Dans chaque groupe, les nœuds sont séparés de 0,3 à 1 cm. Les groupes quant à eux sont séparés de 8, 8 et 13 cm. Les tests préliminaires ont montré que la perception du mouvement est immédiate, excepté pour la couleur. Les trois groupes sont facilement identifiés dans le cas de mouvements mixtes et d'oscillations d'angles différents (verticale, horizontale, oblique). Pour les oscillations de tailles différentes, les zooms et les clignotements, les groupes apparaissent trop éloignés pour permettre une comparaison. En revanche, si l'on connaît par avance le nombre et le caractère de chaque groupe, la lecture devient beaucoup plus facile. Remarquons que pour tous ces tests, nous retrouvons le même problème de non persistance de l'information du mouvement. Une fois l'animation terminée l'identification des points de manière précise est perdue. Il faut noter que pour la couleur, le test était biaisé car nous avons déjà des couleurs sur le graphe. En réitérant l'expérience sur des carrés blancs juste entourés d'un bord noir, la perception des trois groupes est alors immédiate. Pour ce graphe particulier, il serait intéressant de coder une autre composante par une variable statique. Le mouvement (ou variation temporelle) de la couleur est très complexe à utiliser car la perception de la couleur en statique n'est pas indépendante des autres variables. Par exemple, si on choisit de combiner la taille avec un mouvement de couleur, nous risquons d'avoir une confusion de perception due à la combinaison des deux variables. En effet, la perception de la couleur d'une tâche dépend de sa taille. Ajouter une variation de couleur sur des éléments de tailles différentes implique une perception différente de la variation de la couleur. Il reste donc à étudier si le mouvement de couleur peut se combiner à une autre variable rétinienne statique. En dernier lieu, nous avons refait tous les tests sur le graphe sans arête, c'est-à-dire uniquement constitué de nœuds. Les résultats sont alors encore meilleurs. Cela se justifie bien avec la théorie de la gelstat qui donne une importance au vide. En effet, sans arêtes, on perçoit plus facilement la proximité des nœuds et il est plus facile de trouver la forme des groupes. De plus, les arêtes surchargent la visualisation et les enlever simplifie donc certaines lectures.

Dans le deuxième cas, il y a toujours les mêmes nœuds colorés, mais les trois groupes sont choisis plus proches les uns des autres. Les groupes sont distants de 1,5 à 2 cm et dans chaque groupe les nœuds sont distants d'environ 0,5 cm en

respectant un alignement. Tous les résultats sont bons, sauf pour le mouvement de couleur sur le graphe coloré. Comme précédemment, les résultats sont encore meilleurs quand il n'y a pas d'arête.

Dans le troisième cas, nous avons disséminés les points de chaque groupe avec une distance d'environ 15 cm, ce qui a pour effet d'entremêler les groupes. La seule expérience qui permet de déterminer le nombre de groupes immédiatement est celle des mouvements mixtes. Sur le graphe constitué de carrés blancs, la couleur donne aussi de très bons résultats.

Expériences à faire

Ces résultats ne constituent qu'une approche préliminaire du problème et des études doivent être menées dans de multiples directions pour valider l'usage du mouvement dans la lecture des graphes.

Dans un premier temps, nous pouvons constater qu'il y a une influence de la position spatiale des éléments sur la variable mouvement : plus les éléments des catégories à percevoir sont entremêlés dans l'espace, plus la perception des catégories est difficile. Ainsi le premier type d'expériences, préconisées par Bertin et effectuées sur des variables pures positionnées sur un carré, ne peut pas suffire. Cette constatation est vraie pour toutes les variables de codage. Néanmoins, dans certains cas de combinaisons de mouvement avec des variables statiques, si le nombre des catégories est petit, l'effet pop-up l'emporte créant différents plans. Les paramètres suivants sont à étudier : nombre de points en mouvement, pourcentage de points en mouvement par rapport aux points fixes, répartition des points dans l'écran, répartition des points dans chaque groupe, répartition et nombre de groupes. Il faut aussi approfondir la différence de perception ressentie lorsque les mouvements sont appliqués sur un graphe avec ou sans arête.

De même, nous n'avons pris que quelques exemples d'implémentation du mouvement. Il faut élargir la recherche sur d'autres implémentations, tester d'autres trajectoires, approfondir la phase et la fréquence, en implémentation ponctuelle sur les nœuds ainsi qu'en implémentation linéaire pour les arêtes. En effet, nous avons cité des tâches où il serait très judicieux de faire intervenir un mouvement sur les arêtes. En perception sélective, la longueur des catégories utilisables doit être définie. Des tests sont à effectuer sur les variables ordonnées et quantitatives. Il serait intéressant d'effectuer les mêmes tests avec une variable statique rétinienne afin de valider l'apport de la variable de codage mouvement par comparaison.

Le cas de la trajectoire couleur est particulier. Dans notre cas, la présence de la variable statique couleur perturbe la perception de la variable temporelle couleur. Nous devons donc envisager un codage de base ne faisant pas intervenir cette variable statique.

Dans les exemples précédents, nous nous sommes placés à une distance donnée du graphe. Qu'advient-il de l'utilisation du mouvement lors de changements d'échelle ? Que se passe-t-il lorsque les nœuds sont affichés plus petits ou plus grands (1 mm de côté,...) ? Les différents types de mouvements sont-ils affectés de la même manière par le changement d'échelle ? Quel impact aurait ce phénomène sur la continuité de la perception lors d'un changement d'échelle ?

Les tests effectués nous ont amenés à la remarque suivante : l'efficacité du codage par le mouvement dépend de la connaissance préliminaire de ce qu'on cherche à percevoir. En effet, **si l'utilisateur connaît déjà le nombre de catégories à identifier, il réalise immédiatement des tests qu'il ne réalisait pas facilement autrement.** L'apprentissage et la connaissance *a priori* du type de tâches à réaliser jouent un rôle extrêmement important dans le cas visuel. L'efficacité d'un codage doit donc s'effectuer à deux niveaux d'usages : un usage

régulier et un usage découverte. Cette remarque sort du cadre défini par Bertin mais ouvre des perspectives intéressantes au niveau des expérimentations.

Pour répondre au problème de non persistance du mouvement dans l'utilisation interactive, nous aimerions étudier quel serait l'impact d'une trace statique de ses effets.

En dernier lieu, l'effet pop-out provoqué par le mouvement peut être particulièrement utile dans le cas d'un graphe bi-partite. Si on reprend l'exemple de Nakayama et Silverman (1986), la translation oscillatoire permet de mettre sur un plan différent les ronds et les carrés, et dans chaque plan on peut distinguer préattentivement les couleurs.

5.3 Discussion sur l'utilisation du mouvement

Reprenons l'exemple du graphe des JT d'ARTE, il reste encore beaucoup d'informations à afficher, autant de situations où le mouvement semble pouvoir apporter des solutions. Les mouvements oscillatoires sont des candidats pertinents pour ajouter un attribut aux nœuds ou améliorer la lisibilité de la structure du graphe en affichant un arbre, des voisins,... Dans le cas des arêtes, il serait intéressant d'étudier si une vibration pouvait coder la tension et si l'orientation et les chemins pouvaient être visualisés en dynamique. Remarquons que, dans ce cas particulier, il serait encore plus pertinent de se servir du mouvement pour indiquer le sens de déplacement, par exemple en déplaçant un point sur une arête. Dans ce cas, le mouvement devra être étudié dans les perspectives développées par Bertin, (rapport de différentes classes d'entités) mais aussi du point de vue de ce qu'il apporte comme informations supplémentaires (ici le sens de l'arête). En effet, toutes les interprétations sont à prendre en compte. C'est aussi le cas pour la variable statique de couleur où le rouge sous-entend une information plus importante que les autres couleurs.

Dans son travail, Bertin affirme que l'on ne peut pas créer une image qui soit immédiatement perceptible avec plus de deux variables pour un graphe, une planaire et une rétinienne, ou trois variables pour un diagramme. Si un graphe contient plus de deux composantes, l'identification nécessitera plusieurs instants de perception. Avec l'introduction du mouvement, il est alors possible **d'ajouter une variable significative dans une image**. En effet, d'une part nous avons vu que certaines combinaisons comme mouvement-couleur ou mouvement-forme restaient préattentives. D'autre part, **si le mouvement est utilisé de manière interactive, il vient se superposer à une image déjà perçue**. Enfin, pourquoi ne pas imaginer utiliser la variable mouvement pour augmenter la longueur d'une variable ? Cependant, la discontinuité introduite dans la lecture par le changement de variable peut perturber la perception de l'ordre. Aussi cette dernière possibilité doit-elle être manipulée avec circonspection.

Le mouvement possède une particularité très intéressante, **l'effet « pop-out »** qui génère une discontinuité au niveau perceptif : le mouvement accapare l'attention au détriment des variables statiques, modifiant la notion d'ordre introduite par Bertin. Cette propriété impose donc une lecture à deux niveaux, qui devient particulièrement intéressante si elle est contrôlée par l'utilisateur lors d'un processus interactif. En effet, l'apparition contrôlée de la variable mouvement permet alors de mettre en évidence des éléments dans un ensemble grâce à cette rupture perceptuelle de la notion d'ordre : **la variable mouvement est perçue avant les variables statiques**. Par ailleurs, **la présence du mouvement dans une visualisation et son analyse constitue une tâche fatigante**, puisqu'elle requiert une attention continue de la part de l'utilisateur. Cette constatation amplifie l'idée que c'est **l'association avec un processus interactif** qui en contrôle l'apparition et

éventuellement l'évolution qui donnera à cette variable une réelle efficacité. Dans ce cas, la supériorité de visibilité obtenue pourra devenir un réel avantage.

6 Conclusion

Dans une grande quantité de disciplines, allant de la psychologie perceptive à l'expression artistique, le mouvement est considéré comme l'un des mécanismes les plus puissants pour communiquer des informations. Nous avons ici émis des hypothèses pour introduire le mouvement en tant que nouvelle variable visuelle dans la théorie de Bertin. Bien que les caractéristiques du mouvement ne soient pas entièrement connues, il est déjà clair qu'il est perceptuellement efficace et possède même de meilleures propriétés de regroupement que les variables statiques comme la couleur ou la forme. La performance du codage par le mouvement serait ainsi même d'autant meilleure que la tâche serait compliquée. Enfin, à la remarque émise par Bertin sur le fait que les variables dynamiques peuvent écraser des variables statiques, nous pouvons répondre que cette caractéristique peut devenir un avantage dans le cadre d'une utilisation ponctuelle liée à l'interaction. Cette étude nous a permis d'élaborer une définition de la variable mouvement ainsi qu'un certain nombre d'hypothèses sur ses propriétés et de les discuter dans le cadre de la visualisation de graphes. Le système ainsi proposé est encore incomplet : certaines hypothèses ont été vérifiées par des expérimentations publiées mais de nouvelles expérimentations devront être menées afin de valider ce modèle. Ce travail nous a permis d'élaborer le cadre de ces nouvelles expérimentations à venir.

Bibliographie

- Andersen, G.J. (1989). Perception of three-dimensional structure from optic flow without locally smooth velocity. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception & Performance*, 15, 363-371.
- Bartram, L.R. (2001). *Enhancing information visualization with motion*. Ph.D. thesis, School of Computing Science, Simon Fraser University.
- Bartram, L., Ware, C. (2002). Filtering and Brushing With Motion. *ACM Journal of Information Visualization*, 1(1), 66-79.
- Bertin, J. (1967). *La sémiologie graphique*. Editions Mouton, Gauthier-Villars, Paris.
- Blake, R., Aiba, T.S. (1998). Detection and discrimination of optic flow components. *Japanese Psychological Research*, 40, 19-30.
- Bonin, S. (1997). Le développement de la graphique de 1967 à 1997. In *Colloque 30 ans de sémiologie graphique*, Paris 12-13 décembre 1997.
- Braddick, O.J., Holliday, I.E. (1987). Serial search for targets defined by a divergence or deformation of optical flow. *Perception*, 20, 345-354.
- Brewer, C.A. (1994). Color Use Guidelines for Mapping and Visualization. In *Visualization in Modern Cartography*, A.M. MacEachren and D.R. Fraser Taylor (eds.), Elsevier Science, Tarrytown, NY, chap 7, 123-147.
- Brown, J.L. (1965). Flicker and intermittent stimulation. In *Vision and Visual Perception*, C. H. Graham (ed.), John Wiley & Sons, New York, 251-320.

- DiBiase, D., MacEachren, A.M., Krygier, J.B., Reeves, C. (1992). Animation and the role of map design in scientific visualisation. *Cartography and Geographic Information Systems*, 19 (4), 201-214.
- Dick, M. (1989). *Parallel and serial processes in motion detection*. Unpublished thesis, Weizmann Inst (Rehovot, Israel).
- Driver, J., MacLeod, P., Dienes, Z. (1992). Motion coherence and conjunction search: Implications for guided search theory. *Perception & Psychophysics*, 51 (1), 79-85.
- Gibson, E.J., Gibson, J.J., Smith, O.W., & Flock, H. (1959). Motion parallax as a determinant of perceived depth. In *Journal of Experimental Psychology*, 58, 40-51.
- Green, M. (1998). Toward a perceptual science of multidimensional data visualization: Bertin and Beyond. In *ERGO/GERO Human Factors Science*.
- Guillaume, P. (1942). *La psychologie de la forme*, Ernest Flammarion éditeur.
- Hayward, S. (1984). *Computers for animation*. Norwich UK: Page Bros. Ltd.
- Healey, C.G. (1992). *Visualization Of Multivariate Data Using Preattentive Processing*, Master's Thesis, Department of Computer Science, University of British Columbia.
- Healey, C. (1996). Choosing effective colours for data visualization. In *Proceedings IEEE Visualization'96 (San Francisco, California, 1996)*, IEEE Computer Society Press, pp. 263-270.
- Hohnsbein, J., Mateeff, S. (1998). The time it takes to detect changes in the speed and direction of visual motion. *Vision Research*, vol. 38, 2569–2573.
- Ivry, R.B. (1992). Asymmetry in visual search for targets defined by differences in movement speed. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception & Performance*, 18(4), 1045-1057.
- MacEachren, A.M. (1994). Time as a cartographic variable. In Unwin D.J. Hearnshaw H.M. (Eds.), *Visualization in Geographic Information Systems*, Wiley, 115-130.
- Mulligan, J.B. (1992). Motion transparency is restricted to two planes. *Investigative Ophthalmology and Visual Science*, Vol. 33 (suppl.), p. 1049.
- Nakayama, K., Silverman, G.H. (1986). Serial and parallel processing of visual feature conjunctions. *Nature*, 320, 264–265.
- Robertson, G.G, Card, S.K, Mackinlay, J.D (1999). Information Visualization Using 3D Interactive Animation. In *Readings in Information Visualization: Using Vision to Think*, Card S.K, Mackinlay J.D, Shneiderman B. (eds.), Morgan Kaufmann Publishers: San Francisco, 515-529.
- Saulnier, A. (2005). La perception du mouvement dans les systèmes de visualisation d'informations. In *Actes de la conférence IHM. IHM 2005*, ACM Press, 185-192.
- Sekuler, R., Watamaniuk, S.N.J., Blake, R. (2002). Perception of Visual Motion. In H. Pashler (Series Ed.) & S. Yantis (Vol. Ed.), *Stevens' Handbook of Experimental Psychology: Vol. 1. Sensation and perception (3rd edition)*, Wiley & Sons, New York, 121–176.

- Tayama, T. (2000). The minimum temporal thresholds for motion detection of grating patterns. *Perception*, 29, 761-769.
- Thièvre, J. (2006). *Cartographies pour la Recherche et l'Exploration de données Documentaires*. Thèse de l'Université de Montpellier II, novembre.
- Treisman, A., Gormican, S. (1991). Search, similarity and integration of features between and within dimensions. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 17 (3), 652-676.
- Tynan, P.D., Sekuler, R. (1982). Motion processing in peripheral vision: Reaction time and perceived velocity. *Vision Research*, 22(1), 61-68.
- Viaud, M.L., Thièvre J., Saulnier, A. (2006). Cartographie d'information & Bibliothèques numériques : Graphes, Diagrammes et Arborescences pour l'accès aux bases vidéo. *Document Numérique*, numéro spécial Visualisation dans les bibliothèques numériques, vol. 9, N2, 57-82.
- Ware C and Limoges S. (1994). *Perceiving data displayed through oscillatory motion*. Technical report TR94-089, Faculty of Computer Science, University of New Brunswick.
- Ware C., Bobrow R. (2004). Motion to support rapid interactive queries on node-link diagrams. *ACM Transactions on Applied Perception*, 1(1), 3-18.
- Weger, G. (1999). *Cartographie (volume I) : sémiologie graphique et conception cartographique*. Support de cours, Ecole Nationale des Sciences Géographiques, Marne La Vallée.
- Williams, D.W., Sekuler, R. (1984). Coherent global motion percepts from stochastic local motions. *Vision Research*, 24, 55-62.