Zeitschrift: Geschichte und Informatik = Histoire et informatique
Herausgeber: Verein Geschichte und Informatik
Band: 18 (2015)

Artikel: Principes et usages des dessins de réseaux en SHS
Autor: Cristofoli, Pascal
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-685427

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 13.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

PRINCIPES ET USAGES DES DESSINS DE RÉSEAUX EN SHS

Pascal Cristofoli

Network visualizations are now very popular: they are apparently simple to read and many tools allow making them easily. This success invites us to examine the nature of this kind of representations. It was designed in the last century in the context of social research focusing on the study of social interactions. The history of network layouts allows us to understand their building principles and their status in research contexts. This point of view is essential to make a rational use of these visualizations, especially while technical developments are transforming them into a powerful tool for relational data exploration.

L'analyse des réseaux sociaux s'est considérablement développée depuis les années 1970 autour d'une approche relationnelle des objets de recherche en sciences humaines et du développement d'outils d'analyse mathématique des structures relationnelles. Les recherches menées dans ce domaine font régulièrement appel à des visualisations de réseaux pour figurer les données et concepts qu'elles manipulent et étudient. Si dans les premiers temps ces figures de réseaux étaient réalisées à la main, elles sont aujourd'hui produites automatiquement à l'aide d'algorithmes peu à peu intégrés dans les logiciels.

Dans son article retraçant l'histoire de la visualisation des réseaux sociaux, L. Freeman souligne que « les images ont, et ont toujours eu, un rôle clef dans les recherches sur les réseaux [...], tant pour le développement des idées structurales que pour leur communication aux autres »[1]. L'objet de ce texte est d'interroger les visualisations de réseaux: leur nature, les principes de leur construction et les conditions de leur utilisation dans les travaux scientifiques en sciences humaines et sociales, et notamment en histoire[2].

Introduction: une généralisation de l'usage des dessins de réseaux

D'une présence peu discutée à un usage courant

Ces questions ont finalement été relativement peu discutées au sein de la communauté des réseaux sociaux, hormis les travaux de quelques spécialistes, souvent producteurs d'algorithmes et de logiciels. La revue au cœur du domaine, *Social Networks,* ne consacre à la visualisation que très peu d'articles en regard d'autres concepts (densité, centralité, etc.). L'article régulièrement cité de Klovdal publié en 1981[3] a finalement peu de suites et si les questions de visualisation ne sont pas totalement absentes, elles ne constituent que très rarement l'objet principal des articles. On constate la même tendance dans les manuels classiques d'analyse de réseaux: le recours à des visualisations y est fréquent, mais souvent sans que leurs utilisations soient discutées en tant que telle. Et si la question de leur production est évoquée, c'est surtout du point de vue de son intégration dans les logiciels, et ce bien souvent sans expliciter plus avant les enjeux de la construction et de l'utilisation des représentations de réseaux[4].

La visualisation des réseaux est abordée plus directement dans les revues au format plus souple et diffusées en ligne: la revue *Connections* et surtout, à partir des années 2000, au sein du *Journal of Social Structure (JoSS)* dont le fondateur n'est autre que D. Krackhardt, concepteur du programme

Krackplot au début des années 1990[5]. Le premier article qui y est publié est celui de L. Freeman déjà cité. Depuis lors, cette revue fait régulièrement place à des présentations d'algorithmes de visualisation ou d'exemples de travaux laissant une large place aux visualisations[6]. C'est finalement autour de cette revue que l'on peut identifier les chercheurs travaillant sur cette question. Dans son introduction au *JoSS Visualization Symposium* organisé en 2010[7], J. Moody, nouvel *Editor*, rappelle cette spécificité de la revue, grandement facilitée par sa publication en ligne. Il souligne que la production de figures de réseaux a pris de l'ampleur avec les outils et techniques parus dans le courant des années 1990, et que les images de réseaux sont aujourd'hui adoptées par les revues scientifiques et les grands médias – tel le *New York Times* – qui y font régulièrement appel.

J. Moody constate toutefois qu'à l'exception de quelques travaux, il n'existe pas de guide de « bonnes pratiques » pour aider à la réalisation de dessin de réseaux.

La situation évolue sensiblement sous l'effet de telles initiatives[8] et en raison du décloisonnement des communautés scientifiques intéressées à cette question depuis quelques années[9]. Elle évolue aussi sous la pression de la généralisation et de la démocratisation de l'usage des images de réseaux insufflées par les développements du web, la multiplication des bases de données et des outils de sociabilité en ligne (Friendster, Facebook, Twitter, etc.). Les visualisations de réseaux concernent aujourd'hui de nombreux domaines et activités sociales[10]. Un foisonnement de textes accessibles en ligne s'attachent à présenter, comparer et vulgariser les techniques de visualisation, ou bien se lancent dans des entreprises plus larges d'explicitation[11].

De fait, à l'heure actuelle, un chercheur désirant réaliser un dessin de réseau à partir de ses données dispose d'une panoplie impressionnante d'outils et d'algorithmes relevant de ces différents domaines. La capacité à utiliser tel ou tel outil dépend bien sûr des cultures et disciplines scientifiques, de l'aisance vis-à-vis de l'informatique et du traitement des données ainsi que de la compréhension des principes des logiciels.

Dans le domaine des études de réseaux sociaux, quelques outils généralistes ont été plus particulièrement utilisés depuis le milieu des années 1990 pour produire des dessins de réseaux. Il s'agit notamment: du logiciel d'analyse de réseaux *Ucinet* et de son module de visualisation associé *Netdraw;* du logiciel *Pajek* développé par des mathématiciens slovènes pour lesquels la visualisation fait partie intégrante de « l'analyse exploratoire des réseaux sociaux »[12]; ou bien encore du logiciel *Visone* qui partage cette approche. À la fin des années 2000, apparaît une nouvelle génération de logiciels permettant notamment de travailler directement

sur les données du web: *Gephi* et *NodeXL*. Il faut aussi compter avec les modules spécialisés du logiciel statistique *R* qui soulignent que l'analyse de réseaux a désormais intégré la panoplie des techniques des statisticiens (*Igraph, Statnet*). D'autres outils performants existent mais sont moins utilisés dans la communauté des SHS. Il s'agit de logiciels commerciaux[13] ou encore de logiciels libres produits par des équipes de recherche en mathématique et/ou informatique[14].

La visualisation des réseaux sociaux au carrefour de plusieurs champs de recherche

L. Krempel[15] rappelle que, loin d'être cantonnée au seul champ des réseaux sociaux, la visualisation des réseaux relève aujourd'hui des communautés scientifiques du dessin de graphe (*Mathematical Graph Drawing*) et de la visualisation de l'information (*InfoVis*), mais aussi des domaines de la statistique graphique (*Statistical graphics*) et de l'esthétique (*digital art*).

L'énumération de ces différents champs d'études permet de rappeler le contexte et la chaine d'opérations qui autorisent un chercheur non seulement à produire des visualisations de réseau, mais aussi à en justifier l'intérêt et surtout à les exploiter à bon escient. Un objet de recherche peut être envisagé en termes relationnels et l'opérationnalisation de cette approche relationnelle peut aboutir à la production d'un ensemble de données organisé sous la forme d'un ou plusieurs « réseaux sociaux »; chaque réseau social peut être formalisé en un graphe mathématique décrivant sa structure et c'est cet objet mathématique qui pourra être représenté graphiquement par un ou plusieurs dessins adaptés.

Plusieurs « moments » importants jalonnent cette chaîne et doivent être rappelés car ils permettront de contextualiser l'histoire des visualisations de réseaux ainsi que leur évolution récente.

N. Elias montre l'utilité de déplacer l'intérêt des chercheurs de l'étude des entités sociales pour elles-mêmes vers celle de leurs interactions réciproques et des configurations sociales que ces interactions engendrent[16]. Cette approche relationnelle des phénomènes sociaux puise dans de nombreuses traditions scientifiques dont on peut retracer l'histoire[17]. Du point de vue des études historiques, quelques travaux pionniers ont ainsi démontré les avantages heuristiques d'une approche relationnelle pour formaliser et analyser les objets de recherche[18].

L'approche relationnelle concentre son attention sur les configurations sociales et les questions de topologie et de voisinage deviennent un sujet primordial. Cet ensemble de notions est propice à la formalisation: au sens mathématique du terme, un graphe est composé d'un ensemble d'objets (sommets) et d'un ensemble de couples de sommets (arêtes)

définissant une relation. La théorie des graphes constitue un champ de recherche à la croisée des mathématiques et de l'informatique dédié à la manipulation et à l'étude des graphes. Elle est à l'intersection de plusieurs disciplines, objets et champs de recherche, ce qui favorise le transfert de technologies et de problématiques[19]. L'analyse des réseaux sociaux a ainsi puisé dans ces travaux pour construire les indices et autres mesures proposés aujourd'hui par les logiciels.

Les développements de la théorie des graphes ont très souvent été accompagnés d'un recours à des représentations visuelles. Le caractère intuitif des dessins permet d'expliciter efficacement définitions, concepts et problèmes. C'est le cas par exemple du problème des sept ponts de Königsberg exposé par Euler en 1735[20], souvent cité comme prémisse de ce champ de recherche. Les études sur les réseaux sociaux ont puisé dans cette tradition et utilisent régulièrement des dessins de graphes pour communiquer informations et concepts ou bien pour visualiser les structures relationnelles qu'elles manipulent. Du point de vue de la théorie des graphes, dessiner un graphe est un problème complexe dès que le nombre d'objets à représenter devient important, si bien qu'une communauté de recherche spécifique s'est emparée de la question du dessin de graphe[21].

L'étude de la meilleure façon de représenter visuellement des graphes est envisagée du point de vue des préceptes énoncés par les spécialistes de la visualisation de l'information. Ce champ de recherche se donne pour objectif de préciser comment réaliser des représentations graphiques de données « efficaces ». Cette question est intimement associée à l'étude de la manière dont les individus appréhendent les images qui leur sont soumises, c'est-à-dire dont les images sont perçues par l'œil et le cerveau humain. En la matière, il apparaît que le sens visuel constitue le moyen le plus efficace de transmettre une information, notamment en raison de l'existence d'une perception pré-attentive fondée sur la reconnaissance instinctive de formes reposant sur quelques principes simples : proximité, similarité, fermeture, continuité et symétrie[22]. J. Bertin et ses successeurs ont ainsi constitué une véritable grammaire visuelle – la sémiologie graphique – précisant les règles et les contraintes permettant de construire des représentations graphiques adaptées à la nature des données et des informations à transmettre[23]. Les principes de l'excellence graphique[24] permettent de juger de la qualité et de l'efficacité de la transcription graphique de l'information : une représentation graphique sera d'autant plus « utile » qu'elle propose une présentation bien dessinée de données intéressantes et qu'elle est capable de communiquer une idée complexe avec clarté, précision et efficacité. Une telle image, presque toujours multivariée, a pour objet de fournir à l'observateur le plus d'idées en un minimum de temps, ceci sans mentir à propos des données.

La visualisation des réseaux fait référence à l'ensemble de ce contexte. Il doit être pris en compte dès lors que l'on se propose d'étudier la façon dont les dessins de réseaux les plus courants sont produits. Il doit aussi être convoqué lorsque l'on examine le statut et les usages de ces dessins de réseaux dans les recherches en SHS.

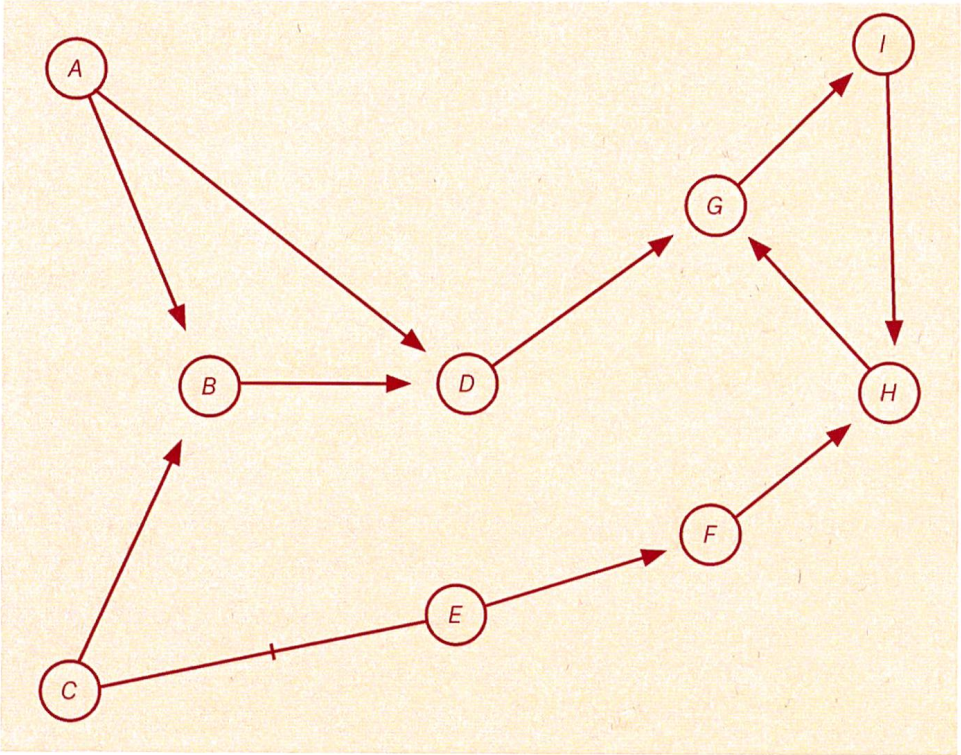
Du dessin manuel au dessin automatisé des réseaux sociaux

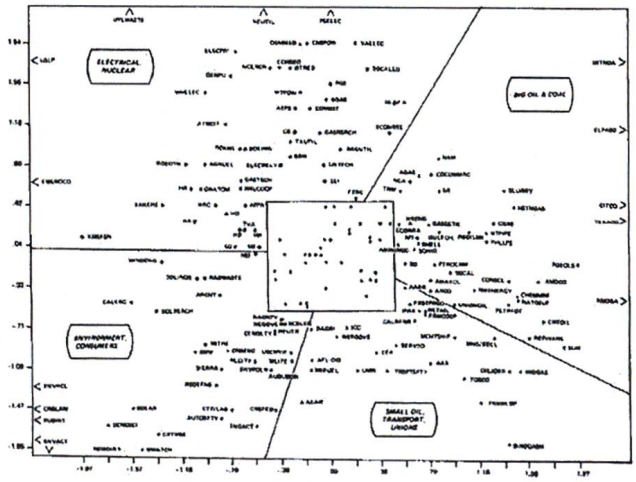
Visualiser les données sociométriques: Moreno et les sociogrammes.

C'est autour des travaux de sociométrie que l'on observe une des premières expériences d'utilisation systématisée de visualisations de données relationnelles dans le champ des SHS.

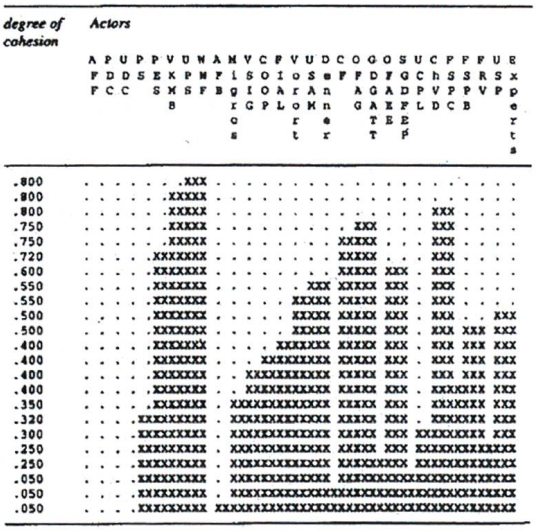
À partir des années 1930, les travaux développés par J. Moreno et ses collègues en psychologie sociale s'attachent à comprendre les comportements individuels à l'intérieur de groupes en étudiant les relations entre les individus. Un des exemples classiques concerne l'étude des interactions entre jeunes enfants observés dans des établissements d'éducation. L'étude des données *sociométriques* est propice à la quantification et à la visualisation. Moreno définit le *sociogramme* comme une « représentation visuelle de données sociométriques ». Il permet d'exposer graphiquement les choix et les rejets de chacun des individus envers ses pairs. Il faut noter que, dès ce moment, Moreno propose des dessins complexes, associant au dessin des interactions entre les individus des informations supplémentaires précisant la nature des liens et les caractéristiques des individus. Pour Moreno, l'utilité des sociogrammes est évidente: ils constituent autant une méthode de présentation qu'une méthode d'exploration. Il souligne la nécessité de définir un principe commun de construction pour assurer la comparabilité des diagrammes. Il propose pour ce faire des « lois de construction des diagrammes standards », fondées sur sa pratique concrète de la construction manuelle de figures et sur son expérience de leur lecture et interprétation: Il faut ainsi placer la personne la plus « choisie » au centre de la figure, minimiser l'intersection des lignes (pour satisfaire à un principe de clarté visuelle), placer les individus dans leur « groupe naturel » et arranger la configuration de façon à rendre le plus visible possible les groupes interconnectés (« clustering »). Un débat sur la meilleure façon de produire des représentations est initié dès cette époque, notamment avec les propositions de représentations alternatives qui seront évoquées en fin de texte[25].

ILLUSTRATION 1
Sociogramme des attractions recensées dans un groupe de jeunes enfants (Source Moreno 1934, Note 25, p. 32)





(c) MDS scatterplot (Laumann and Knoke, 1987, p. 242)



(d) Dendrogram (Scarini, 1996, p. 98)

Figure 3.4: Graphical presentations commonly used for network data

ILLUSTRATION 2
Exemples de visualisations de réseaux issues de la statistique multidimensionnelle (Source U. Brandes, Note 29, p. 38)

Cette réflexion minutieuse sur la façon de dessiner un graphe de relations est à la base des méthodes de représentations actuelles des réseaux sociaux. Toutefois, l'écueil de la taille des réseaux à représenter est resté longtemps limitatif et les spécialistes ont depuis lors cherché à automatiser la production de ce type de représentations. L. Freeman rappelle que les modalités de production des images de réseaux sont étroitement liées à l'évolution de l'informatique, à l'explosion des capacités de calcul ainsi qu'aux progrès des techniques de visualisation. On est ainsi successivement passé du dessin manuel (1930–40) au calcul assisté par ordinateur, fondé sur des analyses factorielles (1950–60), puis à la production d'images automatiques directement à partir de programmes informatiques, notamment via les techniques factorielles ou d'échelonnement multidimensionnel (MDS) (1970–80)[26].

Dessiner un réseau avec les méthodes de la statistique multidimensionnelle

À la fin des années 1980, les résultats graphiques produits par les logiciels d'analyse de réseaux sont dans leur grande majorité issus des procédures de la statistique multidimensionnelle[27]. L'application de ces procédures aux matrices d'adjacences figurant les réseaux ne va pas sans poser de problèmes car ces dernières sont en général peu remplies et ont par nature des « effectifs » faibles (information binaire). En général, elles sont appliquées sur des matrices de distances calculées à partir de la matrice d'adjacence[28].

Les analyses factorielles produisent plusieurs figures d'un même réseau qui résultent du placement des sommets du graphe dans les espaces à deux dimensions déterminés par les multiples « axes » calculés par la décomposition factorielle. La proximité entre les sommets dans les graphiques résultant de ces procédures est de nature « statistique » et ne tient plus directement compte de la topologie. Les méthodes d'échelonnement multidimensionnel tempèrent un peu ces travers : le nombre d'axes est déterminé *a priori* (en général deux ou trois) et ce ne sont plus directement les distances entre les sommets qui comptent, mais le simple ordonnancement des sommets. De manière générale, on constate souvent que chaque nuage de points issu de ces procédures est susceptible d'éloigner des sommets pourtant reliés et qu'un grand nombre de sommets est souvent superposé. Dans ces conditions, la représentation de lignes entre les points figurant les connections entre les sommets du graphe est difficilement réalisable et, dans les faits, le plus souvent non envisagée car incongrue pour ces méthodes. Un autre type de résultats graphiques est proposé par les logiciels : les représentations en arbres hiérarchiques

(dendogrammes) sont produites à l'aide des méthodes de classifications hiérarchiques ascendantes (CAH). Dépendantes des distances et des méthodes choisies pour leur construction, ces représentations décrivent des proximités statistiques et une hiérarchisation entre les sommets qui donnent à voir une image unidimensionnelle et tronquée de la topologie originale du réseau.

Sans nier leur utilité du point de vue de l'analyse structurale des réseaux, il apparaît que les différentes méthodes de représentation graphique issues de la statistique multidimensionnelle ne constituent pas en elles-mêmes des visualisations de réseaux satisfaisantes si l'on se réfère aux critères énoncés par Moreno ainsi qu'aux préceptes de la sémiologie graphique[29]. Les *sociogrammes* sont pourtant utiles et les analystes de réseaux éprouvent le besoin de produire, souvent manuellement, de telles figures, comme en témoigne les dessins de réseaux qui accompagnent certains travaux désormais classiques[30] ou bien qui sont couramment produits dans des domaines spécifiques.

De l'utilité de prendre en compte l'esthétique du dessin: le cas des dessins de réseaux criminels

Au début des années 1990, M. Sparrow publie un article dans la revue *Social Networks* consacré à la comparaison entre les pratiques des spécialistes chargés d'enquêter sur les réseaux criminels et les développements de l'analyse des réseaux. Il présente notamment dans le détail l'usage classique chez les enquêteurs de ce qu'il dénomme les *diagrammes de liens* (« link diagram »), aussi connus sous le nom d'ANACAPA Charts[31].

Il s'agit d'une représentation visuelle à deux dimensions des données relationnelles rassemblées au cours d'une enquête. M. Sparrow précise qu'elle constitue une aide picturale (matérialisée par le dessin accroché au mur) au travail de réflexion engagé par l'enquêteur, sans toutefois s'y substituer. Elle vise à donner un sens à la masse de données accumulées et se révèle extrêmement utile pour communiquer le résultat d'une analyse. Ces diagrammes reposent sur des conventions graphiques de représentation: les individus sont matérialisés par des cercles, les relations entre individus par des lignes (pleines ou en pointillé selon qu'elles sont confirmées ou non) et les affiliations à des groupes ou institutions sont représentées par des rectangles englobant les individus. Le recours à ces visualisations nécessite la création d'une matrice d'adjacence pour préparer les données. Le travail de l'analyste consiste à placer l'individu qui a le plus de liens au centre du dessin, puis à tenter de satisfaire aux objectifs graphiques suivants: la proximité des deux individus dans les

organisations criminelles doit être matérialisée par la proximité des deux individus sur le dessin et l'ensemble du dessin ne doit pas comporter de croisement de lignes.

Sparrow convient que ces objectifs peuvent sembler « bizarres » pour les spécialistes de l'analyse des réseaux et des graphes et il s'emploie à en souligner les limites, sans toutefois renier leur utilité. Il convient qu'il est difficile de générer ce type de figure dans un espace à deux dimensions. Il y voit toutefois une grande utilité car cela permet d'utiliser efficacement la troisième dimension pour illustrer la représentation. Dans un même ordre d'idées, Sparrow estime que la volonté d'éviter les croisements de ligne est compréhensible du point de vue de la lecture mais « perverse » d'un point de vue théorique, car elle sous-entend que le graphe est planaire alors qu'il n'y aucune raison pour qu'un réseau criminel le soit. Enfin, s'il juge « raisonnable » la volonté de représenter la centralité dans les organisations par la centralité sur le dessin, il souligne à regret que c'est le concept le plus frustre de centralité qui est utilisé (centralité de degré). Ce sont les sommets sur lesquels on dispose de la meilleure information qui sont privilégiés, et cette pratique est sensible aux biais existants sur les données, auxquels toutefois les enquêteurs sont fortement sensibilisés durant leur formation.

Comme Moreno en son temps, Sparrow justifie l'utilité de construire des figures de réseaux où les critères esthétiques prennent le pas sur toute autre considération. Cette volonté, partagée par de nombreux autres chercheurs, suscite dès cette époque la mise au point de techniques automatisées de production de représentations de réseaux s'inspirant de ces principes.

Dessiner «automatiquement» un réseau sous la forme d'un diagramme «nœud-lien»

Pour présenter ces techniques, il convient de décrire dans le détail les conventions sur lesquelles elles se fondent ainsi que leurs principes de fonctionnement, ce qui donnera quelques clefs pour l'interprétation des *dessins de réseaux* qu'elles produisent.

Toute opération de visualisation d'une information (transformation) suppose de spécifier clairement l'information à transmettre (la substance), de choisir une représentation appropriée, de spécifier les conventions qui lui sont associées (le design) et enfin de préciser la façon de générer l'image correspondante, c'est-à-dire la procédure et l'implémentation des contraintes qui vont permettre la réalisation de la représentation graphique (l'algorithme)[32].

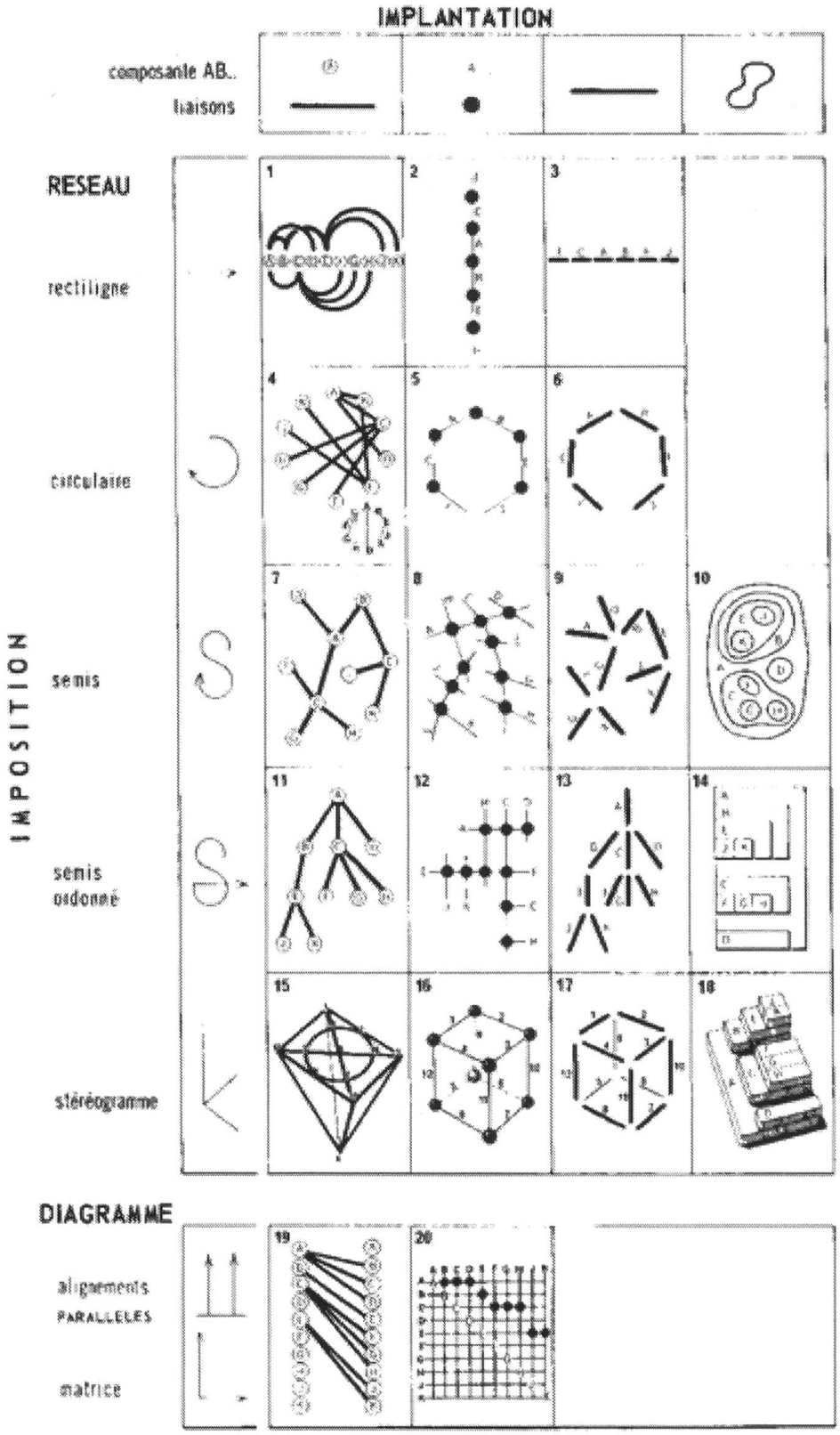
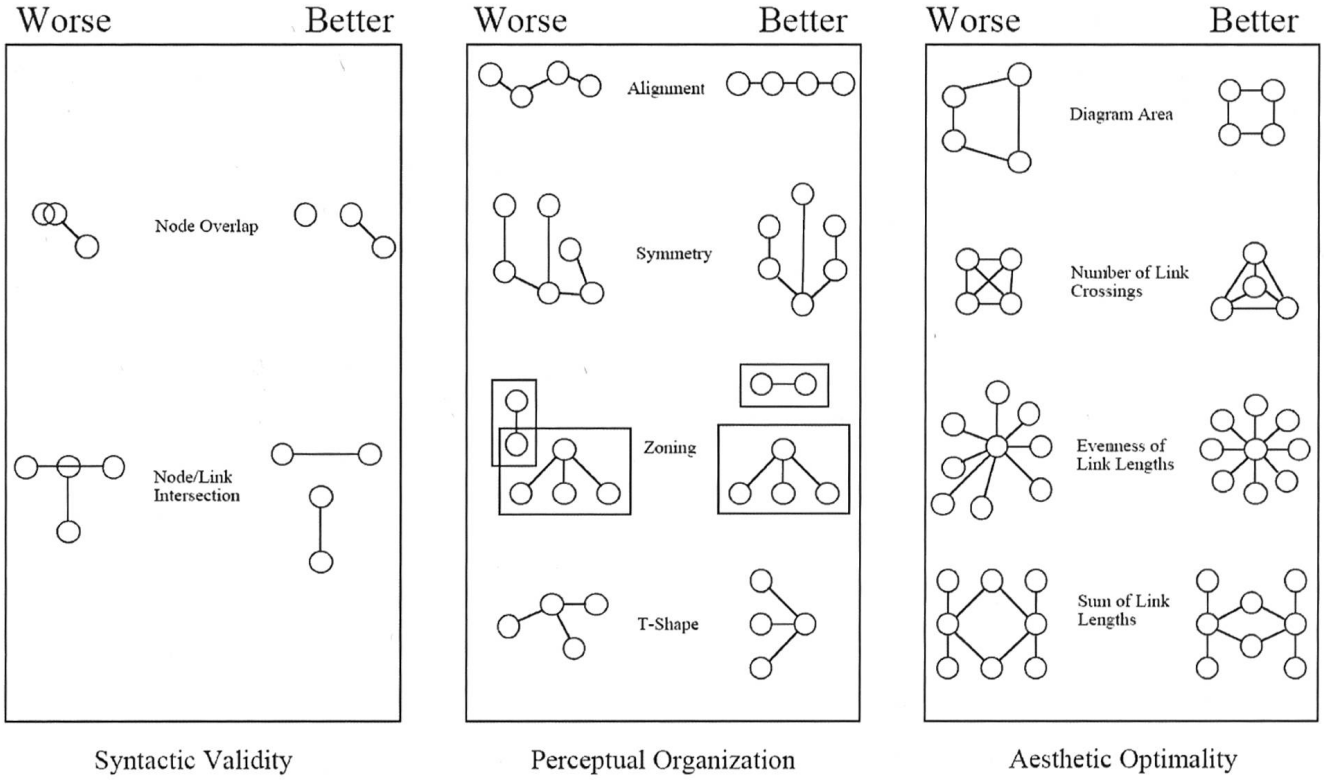
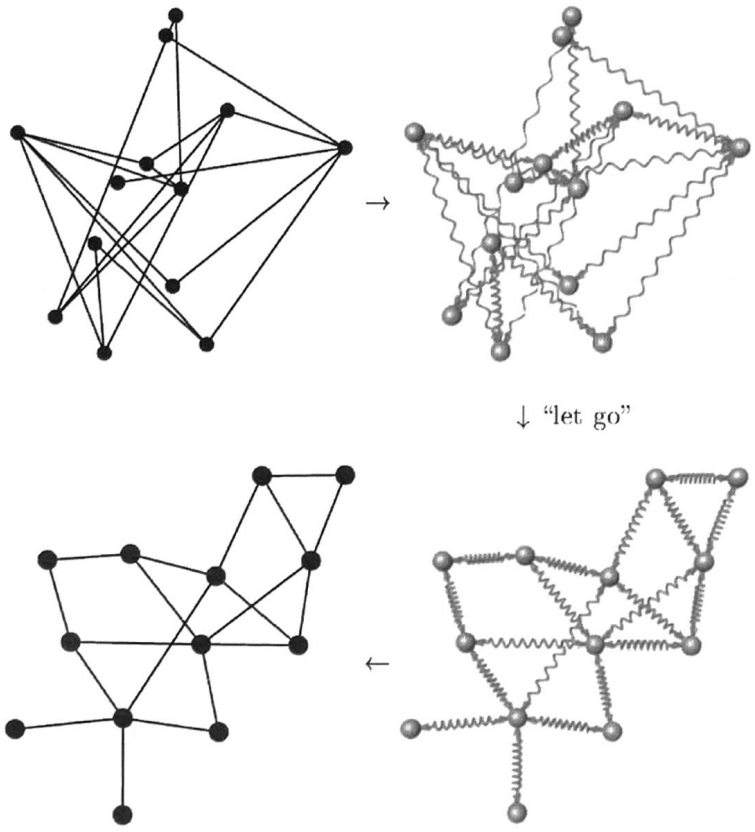


ILLUSTRATION 3
Les réseaux et la sémiologie graphique
(Source J. Bertin, Note 23, p. 270)





↑ **ILLUSTRATION 4**
Exemples de contraintes graphiques influençant la lisibilité
(Source C. Kosak & al., Note 35, p. 2)

→ **ILLUSTRATION 5**
L'analogie avec la recherche d'équilibre d'un système de ressorts
(Source U. Brandes, Note 36, p. 41)

J. Bertin précise que « la construction graphique est un réseau lorsque des correspondances dans le plan peuvent s'établir entre tous les éléments d'une même composante » et il propose à la suite de cette définition toute une « grammaire » de représentations associées.

Nous l'avons vu, les travaux pionniers concernant la visualisation des réseaux sociaux proposent d'adopter une convention de dessin simple et intuitive : des points et des lignes représentent respectivement les sommets et les arêtes du graphe mathématique associé au réseau social. La première qualité de ces *diagrammes nœud-liens*[33] est cette correspondance stricte. Le caractère intuitif de leur lecture par des tiers est un gage de l'efficacité de la communication des informations, cela sous réserve toutefois que la configuration de points et de lignes reste suffisamment « lisible ».

La sémantique des objets graphiques étant définie, il est nécessaire de préciser les conventions graphiques qui vont concrètement permettre de réaliser le dessin. La convention la plus simple est de représenter un lien par une ligne droite. Il ne faut cependant pas perdre de vue qu'un lien peut être figuré par des objets plus complexes : plusieurs segments, une suite de segments alternativement horizontaux et verticaux (ce qui est utile pour tracer les arbres généalogiques), ou bien encore par une courbe (ce qui permettra de figurer plus facilement les liens réciproques). De même, il y a plusieurs façons d'organiser la représentation, c'est-à-dire l'agencement des points (*layout*), qui supposent le développement d'algorithmes adaptés : faire un dessin sur un plan (*Planar drawing*), plaquer le graphe sur une grille (*Grid drawing*) ou bien organiser le dessin de façon hiérarchique (*Upward/Downward drawing*). Sur cette question, J. Bertin se contente de déclarer que l'on peut « placer les figures dans un plan sans signification, et chercher ensuite la disposition qui offre le minimum de croisements ou la figure la plus simple. Après cette transformation, la représentation graphique doit offrir l'efficacité la plus grande. »[34].

Produire une représentation graphique suppose en dernier lieu de définir des règles esthétiques à appliquer à cette représentation. Dans le cas des diagrammes nœud-liens que l'on désire placer sur un plan, l'idée est de reprendre les règles énoncées par Moreno et Sparrow à partir de leurs expériences. Elles visent avant tout à ordonner sur la figure l'information relationnelle afin de la rendre compréhensible et lisible : les sommets connectés doivent être proches et il faut éviter les croisements de lignes et les superpositions. D'autres contraintes esthétiques peuvent être envisagées par exemple pour valoriser l'affichage de symétries, ou bien

minimiser la surface occupée par le dessin. L'ensemble de ces contraintes pourra être invoqué pour juger de la « qualité » des figures produites[35].

Il faut ensuite déterminer concrètement comment réaliser une figure en respectant le mieux possible ces règles et ces contraintes, c'est-à-dire trouver un algorithme permettant de calculer une configuration de points (*layout*) afin de visualiser le graphe selon ces préceptes. Un pas décisif a été accompli de ce point de vue au début des années 1990 avec l'importation, dans le domaine des réseaux sociaux, d'algorithmes issus des sciences physiques (*algorithmes d'énergie*).

Utiliser l'information topologique pour construire le dessin d'un réseau

Les algorithmes par modèles de force (*force directed algorithms*) sont fondés sur une analogie avec le modèle physique d'un système masse-ressort (*Spring embedders*)[36]. Tutte propose en 1963 un premier modèle de ressort fondé sur des forces attractives (méthode des barycentres). Cette approche est approfondie par P. Eades en 1984 quand il définit une méthode de dessin par ressort combinant forces attractives et répulsives. Elle repose sur l'analogie suivante : les sommets sont des boules chargées électriquement et se repoussant mutuellement tandis que les arêtes sont des ressorts de taille constante qui ne peuvent être étirés au-delà d'un certain point. Une telle modélisation privilégie l'esthétique du dessin – « aesthetically pleasing » – en cherchant à satisfaire deux critères : la non superposition de points et la taille relativement uniforme des lignes entre les sommets connectés.

Dans cette classe d'algorithmes, le critère principal de positionnement des points privilégie l'information topologique, c'est-à-dire le comportement relationnel des sommets du graphe. Chaque sommet, du fait de sa connexion ou non connexion aux autres sommets, est soumis à des « forces » respectivement attractives ou répulsives qui déterminent son positionnement dans le système global composé de l'ensemble des sommets et forces agissantes. Tout le travail des algorithmes consiste alors à rechercher une position d'équilibre du système de forces qui satisfasse le mieux possible l'ensemble des contraintes relationnelles pesant sur chacun des sommets.

Une tension globale du système de forces est mesurée par une fonction particulière adaptée aux conventions fixées par chaque algorithme (ex : fonction d'énergie, stress...). Cette fonction peut aussi intégrer dans son

calcul des forces mineures qui contraindront la configuration (force de gravité, effets d'inertie, etc.).

Les algorithmes cherchent à minimiser cette fonction selon une procédure itérative et cumulative. Partant d'une configuration donnée, un vecteur de déplacement peut être calculé pour chaque sommet en tenant compte du champ de forces auxquelles il est soumis: un ressort comprimé repousse les nœuds qu'il relie, alors qu'un ressort étiré les rapproche. Les points sont déplacés en conséquence pour obtenir une nouvelle configuration dont la tension aura ainsi été réduite. Le même processus est répété selon un nombre d'itérations défini ou bien jusqu'à ce que la minimisation de la tension du système ne puisse plus être améliorée de manière significative. Le résultat proposé en sortie est donc une configuration acceptable du point de vue du critère d'équilibre du système de forces, bien qu'il ne s'agisse le plus souvent que d'un minimum local dépendant des conventions et paramètres de départ (configuration initiale aléatoire ou pré-calculée) et d'un certain nombre de choix des algorithmes (déplacement synchrone ou asynchrone des points par exemple).

Le principal apport de l'algorithme de *Fruchterman & Reingold* (1991) réside précisément sur ce point: il utilise des méthodes issues de la thermodynamique (*Simulated Annealing*) pour rechercher directement le minimum global du système de forces dont le modèle associé est celui de corps célestes exerçant d'autant plus leurs tensions-répulsions qu'ils sont proches les uns des autres. L'algorithme de *Kamada & Kawai* (1989) se différencie par un choix particulier de conceptualisation du système de force: la taille idéale du ressort entre deux sommets est définie par la distance géodésique, c'est à dire le nombre minimum d'arcs existant entre ces deux sommets (plus court chemin). Cet algorithme revient alors à minimiser la différence entre la distance euclidienne calculée sur le système de points et la distance topologique, ce qui s'apparente de fait aux techniques d'échelonnement multidimensionnel (MDS). De nombreuses autres variantes de ces algorithmes ont été développées depuis 20 ans. L'algorithme *Reseaulu* proposé par M. Gribaudi & A. Mogoutov en 1993 construit la configuration de manière cumulative en introduisant les points un à un (des plus connectés aux moins connectés)[37]. Plus récemment, l'algorithme *Force Atlas* implémenté dans le logiciel *Gephi* intègre un paramétrage détaillé de nombreuses contraintes qui permettent de régler finement l'algorithme afin de l'adapter à la structure du réseau à représenter.

Les spécialistes du dessin de graphe s'accordent à reconnaître l'utilité de ces algorithmes pour générer des figures efficaces de graphes de taille

« raisonnable »[38]. Kobourov souligne leurs principales qualités : « their natural simplicity, elegance, and conceptual intuitiveness »[39]. Celles-ci sont bien servies par les deux critères esthétiques qu'ils mettent en œuvre : l'uniformisation des distances entre les points connectés et la tendance à afficher des symétries. Relativement simples à implémenter, ils constituent désormais des outils standards intégrés dans tout logiciel proposant des visualisations de réseaux. Soucieux d'obtenir de « belles images » de réseaux, V. Bataglev & A. Mvrar intègrent ainsi dès la première version de *Pajek* les algorithmes Fruchterman-Reingold et Kamada-Kawai. Ils ajoutent à l'implémentation de ces algorithmes des contraintes visant à améliorer la qualité du dessin : éviter les croisements de lignes et les angles trop petits entre deux lignes ayant un sommet en commun, et s'assurer que toutes les lignes vont avoir à peu près la même taille et que les points ne sont pas trop proches des lignes[40].

Impact de la configuration du dessin sur la perception du lecteur

Plusieurs critiques soulignent que ces algorithmes ne proposent en général pas de moyen pour juger de la qualité et de la pertinence des dessins qu'ils produisent. Plusieurs expériences ont tenté de mesurer l'impact de la configuration du dessin sur la perception d'un lecteur.

L'expérience de Mc Graph & Al.[41] réalisée auprès d'un panel d'étudiants vise à explorer l'influence de l'arrangement spatial d'un graphe sur la perception des notions et mesures classiques issues de l'analyse des réseaux sociaux (popularité, intermédiarité et groupes cohésifs). L'enquête confirme que l'arrangement spatial d'un réseau a une influence significative sur la perception des lecteurs, et qu'en la matière il faut prendre garde à dessiner de « bonnes images ». Le meilleur dessin est souvent celui qui illustre les caractéristiques structurelles du réseau étudié, ou du moins une de ses caractéristiques principales. L'analyse des erreurs d'interprétation des personnes est aussi riche en enseignements. Et, de ce point de vue, il est clair que la représentation circulaire a tendance à cacher les différences entre les nœuds. Huang & Al.[42], spécialistes de la visualisation de l'information, organisent une enquête pour juger de la performance de cinq types de représentations d'un graphe en termes d'efficacité de la communication des informations. Le bilan de cette expérience donne lieu à une série de « recommandations » qui confirment les principes de construction mis en place dans les algorithmes, tout en permettant d'envisager des améliorations significatives. Il apparaît clairement qu'un placement au hasard des sommets, générateur de lignes de longueur différente et de multiples croisements n'est pas efficace

pour transmettre l'information contenue dans le graphe. Le dessin sera d'autant plus « performant » qu'il s'attache à souligner et à séparer les points importants des autres, au besoin en disposant le point le plus important au centre (ou en haut). L'étude de l'impact des croisements de lignes souligne qu'il est utile de réduire leur nombre. L'expérience montre toutefois que ces règles générales peuvent-être aménagées sans nuire à la qualité de la représentation : il peut être très utile de raccourcir les arêtes quand les relations se concentrent, d'assembler les nœuds d'un même « groupe » et d'autoriser le croisement des arêtes au sein de ces « groupes ». Enfin, la lecture d'ensemble de la figure est plus aisée si ces groupes de sommets connectés sont séparés spatialement.

Cette dernière remarque introduit une dimension supplémentaire pour juger des figures de réseaux. Il s'agit de leur faculté à être efficace et à garantir des principes constants à différentes échelles d'observation. De ce point de vue, U. Brandes[43] constate que les algorithmes par modèle de force, malgré leur succès et leur utilisation généralisée, sont aujourd'hui insuffisants et dépassés. Il évoque d'autres algorithmes conservant la même philosophie, inspirés de variantes des méthodes d'échelonnement multidimensionnel, pour lesquels les propriétés d'échelle et la rapidité de calcul permet d'obtenir des figures de qualité y compris pour de très grands réseaux[44]. Cette catégorie d'algorithmes est aujourd'hui peu à peu implémentées dans les logiciels : *Gephi* propose l'algorithme *multi-niveau d'Yifan Hue, NodeXl* l'algorithme *Harel Koren Fast Multiscale et Pajek* a récemment intégré *Pivot MDS*[45].

Lectures et usages des dessins de réseaux

Une qualité communément accordée aux diagrammes nœud-liens est le caractère intuitif de leur lecture. Les algorithmes par modèle de force leur confèrent un intérêt supplémentaire en raison de l'adéquation des principes qu'ils intègrent avec le phénomène qu'ils se proposent de représenter: un système interdépendant composé d'objets en interaction. Cette correspondance entre la technique de visualisation et le contexte théorique de son utilisation est un gage de l'efficacité des dessins de réseaux. Elle n'est pas sans rappeler les rapports existants entre l'analyse factorielle des correspondances et la théorie des champs sociologiques de Bourdieu[46].

Cette relative simplicité d'accès a conduit à l'impression diffuse que les images de réseaux auraient un caractère moins scientifique que d'autres outils, et que l'on pourrait en tirer «tout au plus de vagues impressions»[47]. Pour dépasser cette critique, il convient de préciser la façon d'aborder les dessins de réseaux et d'examiner leurs diverses utilisations dans le cadre de travaux de recherches en sciences humaines et sociales, notamment les tendances récentes qui en font de véritables outils heuristiques.

Le statut des dessins de réseaux: une représentation parmi d'autres d'une structure relationnelle

Le statut des dessins de réseaux doit être envisagé en rapport avec les principes directeurs des procédures automatisées qui les ont produits.

La configuration de points organisant le dessin du réseau n'est pas une solution unique: plusieurs figures, toutes aussi «légitimes» les unes que les autres, peuvent être produites à partir d'un même graphe de relations. Pour un algorithme donné, le résultat final dépendra des modalités de son implémentation dans les logiciels, des contraintes plus ou moins sophistiquées qui peuvent y être intégrées, de la configuration adoptée en entrée (constante ou fondée sur la configuration en cours) et des possibilités de paramétrage laissées à l'utilisateur. Le caractère itératif et incrémental de certains algorithmes est susceptible de produire des configurations globales assez différentes en changeant la valeur d'un seul paramètre. Le dessin obtenu est en effet «influencé» par l'algorithme choisi, ses caractéristiques et ses conventions. Certains algorithmes vont être plus ou moins adaptés à la structure du graphe qui leur est soumis et leur efficacité en dépendra. Il est nécessaire de faire un choix raisonné de l'algorithme de dessin en fonction de ses qualités reconnues ou des propriétés structurelles que l'on désire mettre en exergue, comme le suggèrent les concepteurs du logiciel *Gephi*[48]. Un dessin de réseau ne diffère pas des autres procédures de traitement des données, qui, des plus simples aux plus sophistiquées, sont fondées sur de tels choix arbitraires.

Enfin, chaque configuration a le statut d'un « dessin » et non d'un résultat précis, ferme et définitif. La majorité des logiciels propose des outils d'édition manuelle du diagramme obtenu. Ils permettent de retoucher la configuration en déplaçant les sommets (auxquels sont attachés les liens). Il est bien sûr préférable que cette correction manuelle respecte dans la mesure du possible l'idée générale de construction du graphe portée par l'algorithme original, mais de fait, le dernier mot est laissé à l'utilisateur.

Le dessin d'un graphe est, de la même manière qu'une carte, « une technique, un mode d'écriture » des données. Le principal attrait des diagrammes de réseaux est de transposer la totalité des informations composant le réseau initial – sa structure – sur un espace limité. Il y a équivalence entre la matrice décrivant le graphe et les objets graphiques présentés sur le diagramme. Il faut donc absolument éviter de surinterpréter les diagrammes. Le pouvoir de suggestion des images est tel que c'est un piège tentant qui guette les lecteurs enthousiastes ou mal informés, mais aussi les créateurs même du diagramme, ce qui est beaucoup plus gênant. Les diagrammes ne contiennent finalement que ce que l'on a défini lors de la construction des données du réseau. Rien de plus, rien de moins. Un bon moyen pour tenter de limiter le risque de surinterprétation est de s'astreindre à décrire ce que signifient concrètement un point et une ligne sur le dessin. Dans l'idéal, une phrase simple devrait accompagner en légende toute présentation publique d'un graphique de réseau, de la même manière que la production d'une légende est indissociable de la production d'une carte. Il est en effet nécessaire de préciser la nature des sommets et des liens et les limites de leur échantillonnage respectif pour appréhender correctement un diagramme.

Quelques clefs de lecture des dessins de réseau

La lecture du diagramme sera d'autant plus aisée que le sujet du dessin de réseau, les objets et la relation qu'il représente seront clairement précisés. D'autres principes généraux de lecture propres à ce type de représentation peuvent être formulés. Ils sont liés à leur mode de construction.

La lecture du dessin doit se faire indépendamment des coordonnées des sommets (en général, les axes ne sont pas présentés sur la figure). D'un dessin à l'autre, un sommet peut se retrouver aux quatre coins de l'écran sans que cela nuise à l'interprétation de sa position dans la structure du graphe. Seule la position des points relativement les uns aux autres est importante pour l'interprétation. Considérer seulement le nuage des points n'est pas suffisant et peut être source d'erreurs. Il est impératif de tenir compte de la topologie, c'est-à-dire des connections existantes (ou

non) entre les points et de les traduire en termes d'attraction/répulsion pour lire convenablement le dessin.

La lecture des dessins de réseau peut être organisée selon plusieurs niveaux: on peut envisager le dessin dans son ensemble, s'intéresser à des parties du graphe ou à des régions du dessin et enfin se concentrer sur des sommets particuliers. L'ensemble de ces points de vue se complète pour appréhender la structure relationnelle. Ils constituent une trame générale analogue à celle qui organise la panoplie de « mesures » des graphes proposées par la communauté scientifique.

Chaque niveau d'observation peut être abordé selon plusieurs angles. Pour les dessins issus des algorithmes d'énergie, il s'agit de décrire la façon par laquelle un élément (un sous-ensemble, un sommet,...) s'insère dans la configuration globale et d'analyser sa position et son comportement relationnel au sein du système topologique local d'attractions et de répulsions. Il est utile de juger de l'aspect général de la figure, de sa densité (concentration de sommets et de liens) et de son organisation. Est-ce que des sous-ensembles d'éléments connectés se dégagent, est-ce que des parties plus ou moins denses sont repérables? Comment ces parties se distinguent via des axes de symétrie repérables sur le dessin et quelles relations entretiennent-elles les unes par rapport aux autres? Une autre voie de lecture consiste à repérer visuellement des formes élémentaires ou des ensembles de sommets équivalents (cliques, étoiles, chemins, circuits, hiérarchies...).

L'appréciation de toutes ces informations est soumise aux propriétés du graphe de départ. La persistance d'un nombre important de croisements de lignes peut rendre le dessin inefficace et sa lecture très difficile. C'est le cas dès qu'un graphe est par nature très dense ou bien lorsque que l'algorithme de dessin se révèle inadapté à la structure mathématique particulière du graphe considéré. De même, la lisibilité décroît évidemment avec l'augmentation du nombre d'objets à représenter sur un même plan – les grands graphes d'interactions sont aujourd'hui fréquents – sauf à ce que leur structure se prête particulièrement bien aux critères des algorithmes. Cette dernière série de remarques ne remet pas en cause la pertinence de la production de représentations graphiques de réseaux, mais invite simplement à en expérimenter de nouvelles plus adaptées ou à les utiliser d'une autre manière comme nous le verrons.

ILLUSTRATION 6
« Relations » (alliance et économie) entre les positions structurelles repérées lors de l'analyse de l'équivalence structurale dans les réseaux des 92 familles florentines. (Source Padjett & Ansell, Note 30, p. 1276)

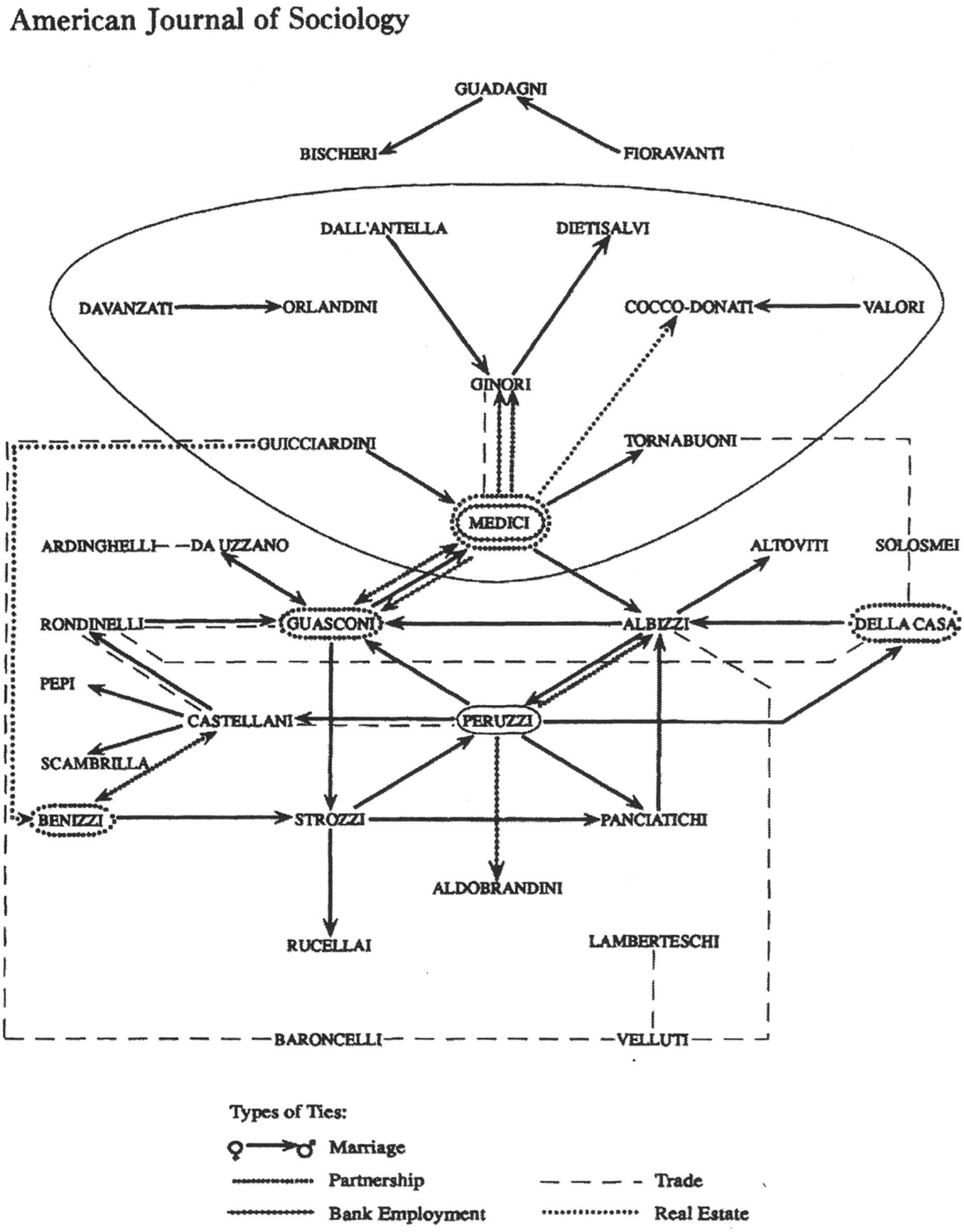


FIG. 2a.—Marriage and economic blockmodel structure (92 elite families)

Les différents usages des dessins de réseaux

Comme l'a rappelé L. Freeman, on trouve de nombreux dessins de réseaux dans la littérature sur les réseaux sociaux. Il est possible de distinguer quelques usages typiques de ces dessins: ils dépendent de la nature des informations sur lesquelles ils se fondent et de l'objectif assigné à la représentation dans le cours du processus de recherche et/ou de communication des résultats de la recherche.

Une première série d'usage d'images de réseaux relève d'une visée de communication.

× Les dessins de réseaux ont souvent été utilisés pour illustrer – manuellement – l'observation de relations interindividuelles dans un ensemble donné. Cet usage métaphorique de la notion de réseau ne suppose pas d'avoir organisé la recherche de manière relationnelle, mais offre la possibilité de produire un résultat sous cette forme. H. Millet propose par exemple un schéma des connections mises au jour entre ermites et réformateurs de la seconde moitié du XIVème siècle, ce qui lui permet d'illustrer son hypothèse de l'existence d'un « réseau » et l'influence de celui-ci sur la diffusion de nouvelles idées sur la spiritualité[49].

× Un autre usage observé fréquemment est de produire des dessins de graphes avec une visée théorique. Il s'agit en général de dessins de petite taille qui servent – presque schématiquement – à illustrer une idée, ou une « intuition » relationnelle. Ce type d'image est souvent utilisé dans les manuels d'analyse de réseaux ou de graphes pour illustrer notions et concepts. De tels dessins de réseaux peuvent aussi être fondés sur des études empiriques. On trouve par exemple ce genre de « schémas » dans les articles de M. Granovetter exposant sa théorie de la force des liens faibles ou bien dans ceux d'E. Bott comparant l'effet de cohésion différentielle des réseaux de sociabilité des couples sur la distribution des rôles conjugaux[50]. Des dessins de ce type sont aussi produits pour décrire et modéliser une source, un protocole d'enquête ou un concept relationnel qui servira ensuite de matrice au recueil de données empiriques.

× Certains dessins présentent des données relationnelles ayant subi des traitements préliminaires. Ils sont un moyen, parmi d'autres, d'illustrer les résultats de ces premières analyses. À ce titre, ils ne portent donc pas la même information et n'ont pas le même statut que ceux produits sur des données relationnelles « brutes ».
Padget & Ansell étudient l'arrivée au pouvoir des Medici à Florence au XVème siècle à partir de la compilation de multiples sources documentaires[51]. Ils définissent un réseau des élites florentines à partir des

liens d'alliance matrimoniale et des liens économiques et financiers observés entre ces familles. Ils procèdent à une analyse structurale de ce réseau (*Blockmodels*). Le résultat de cette analyse est une série de positions (*blocks*) rassemblant des familles ayant des comportements relationnels similaires (le nom de chacun de ces groupes est celui de la famille la plus représentative du groupe) et une matrice des relations existantes entre ces différentes « positions » est produite. C'est à partir de ce « réseau réduit » qu'ils élaborent – manuellement – une représentation graphique. Les sommets et les liens représentés graphiquement dans cette étude sont donc de nature complexe, et ne correspondent pas aux données initialement récoltées mais à un point de vue structural synthétisant ces données. Le dessin de réseau associé est une simple illustration de ce résultat.

× L'automatisation des procédures de dessin de réseaux a permis leur usage dans le processus même du travail de recherche. Un diagramme de réseau peut être utilisé pour représenter visuellement des données relationnelles empiriques. Il s'agit de projeter sur un espace réduit (ou sur un écran) l'ensemble des données (sommets et liens) réunies au cours d'un processus d'enquête. Cette mise en image est utile car elle donne à voir l'ensemble des connections « individuelles » entre les objets, sans le filtre d'une sélection ou d'une synthèse préalable sur ces données. L'étude sur l'évolution de la stratification sociale en France au XIXeme siècle proposée par M. Gribaudi intègre plusieurs représentations graphiques (par période) des configurations de liens observées entre les professions déclarées par les époux et leurs pères dans les actes de mariages[52].

L'utilité des dessins de réseaux fondés sur des données empiriques est de permettre un parcours et une exploration de ces données. De telles représentations ont une vertu heuristique et invitent à un aller-retour constant entre le dessin et les données afin de repérer des connexions inattendues, des erreurs ou bien encore d'expérimenter des hypothèses. Ce type de dessins ne demande pas forcément à être publié, car sa principale utilité reste l'exploration des données et souvent quelques extraits choisis suffisent à illustrer le discours du chercheur.

× Dans ce cas où des dessins de réseaux représentant des données empiriques sont publiées, plusieurs fonctions peuvent être distinguées. Le graphique peut servir de socle pour une présentation organisée des données relationnelles dans une description, la structuration du graphique fonctionnant comme un plan d'analyse. Dans leur ouvrage consacré à l'ethnographie d'une famille andalouse, A. Cottereau & M. Marzok ont reconstitué le réseau de sociabilité du couple de migrants

marocains qu'ils étudient. Ils publient et utilisent le dessin de ce réseau comme fil conducteur pour présenter différentes dimensions de la biographie et de la sociabilité de la famille en rapport avec l'ensemble de l'enquête ethnographique[53].
Un dessin de réseau peut aussi être convoqué en tant qu'outil de publication de source. La représentation est alors équivalente à l'index d'un ouvrage ou à un dictionnaire: elle restitue les données dans un espace limité, selon un ordre particulier et permet un parcours de ces données. Cette utilisation est appelée à se développer avec les possibilités offertes par la publication en ligne et un usage pertinent des liens hypertextes.

Une autre fonction désormais classique des dessins de réseaux représentant des données empiriques est de les considérer comme un fond de carte sur lequel sont projetées des informations supplémentaires issues des données. Ces données concernant les sommets ou les arêtes du réseau sont efficacement visualisées en tenant compte des préceptes de la sémiologie graphique (variation de couleurs, de formes et de tailles). C. Lipp et son équipe proposent des représentations graphiques du paysage social de la ville d'Esslingen au moment des révolutions de 1848 à partir de la compilation d'un grand nombre de sources historiques et de pétitions et en distinguant à l'aide d'une variable visuelle les divers corps sociaux impliqués[54].

F. Ghitalla, dans un autre domaine, conceptualise une véritable *cartographie des disciplines scientifiques* fondée sur des dessins de réseaux exploitant les co-citations de revues[55]. Cette utilisation des dessins de réseaux comme fonds de carte est aussi au cœur des visualisations proposées dans les travaux issus des enquêtes sur les réseaux egocentrés de M. Gribaudi ou de C. Bidart[56]. Elle se double dans ce cas d'une dimension supplémentaire qui vise à susciter la comparaison des formes et du contenu de ces *collections* de figures de réseaux egocentrés. Cette comparaison peut être fondée sur l'observation de réseaux d'individus différents ou bien sur le recueil de différents états du réseau d'un individu à plusieurs moments de son existence.

ILLUSTRATION 7
Pétitions et pétitionnaires distingués selon leur profession
à Esslingen, (1848-49)
(Source C. Lipp & L. Krempel, Note 54, p. 15)

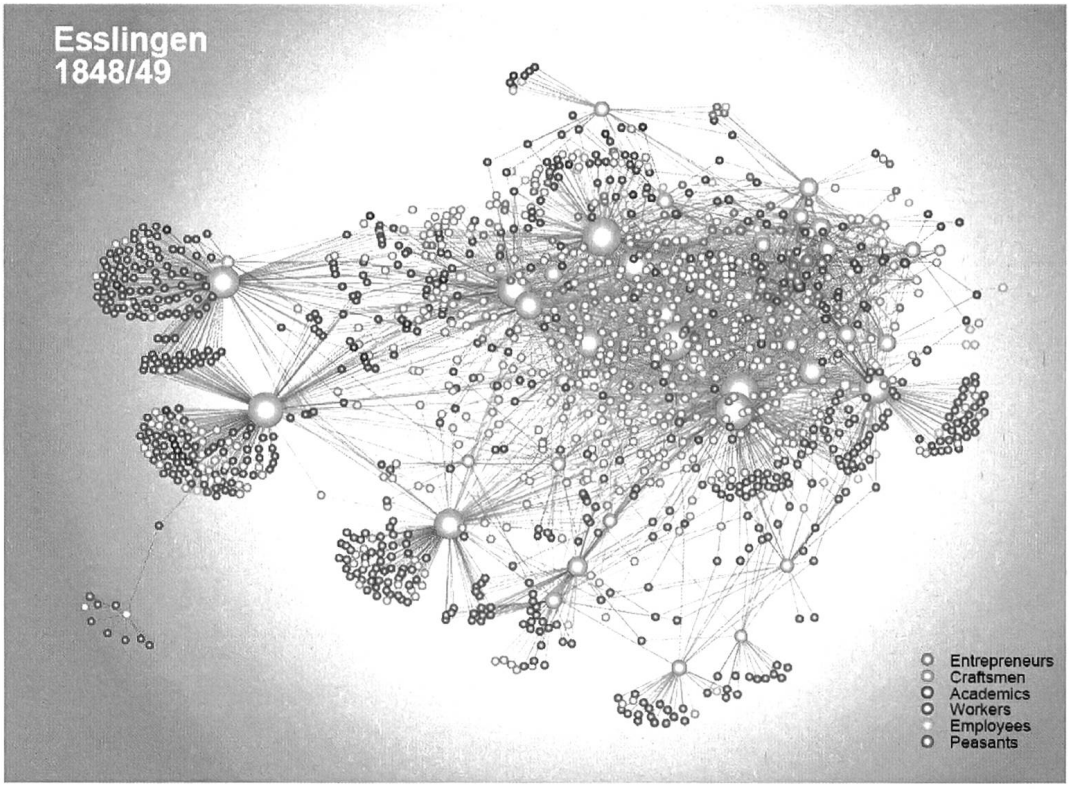
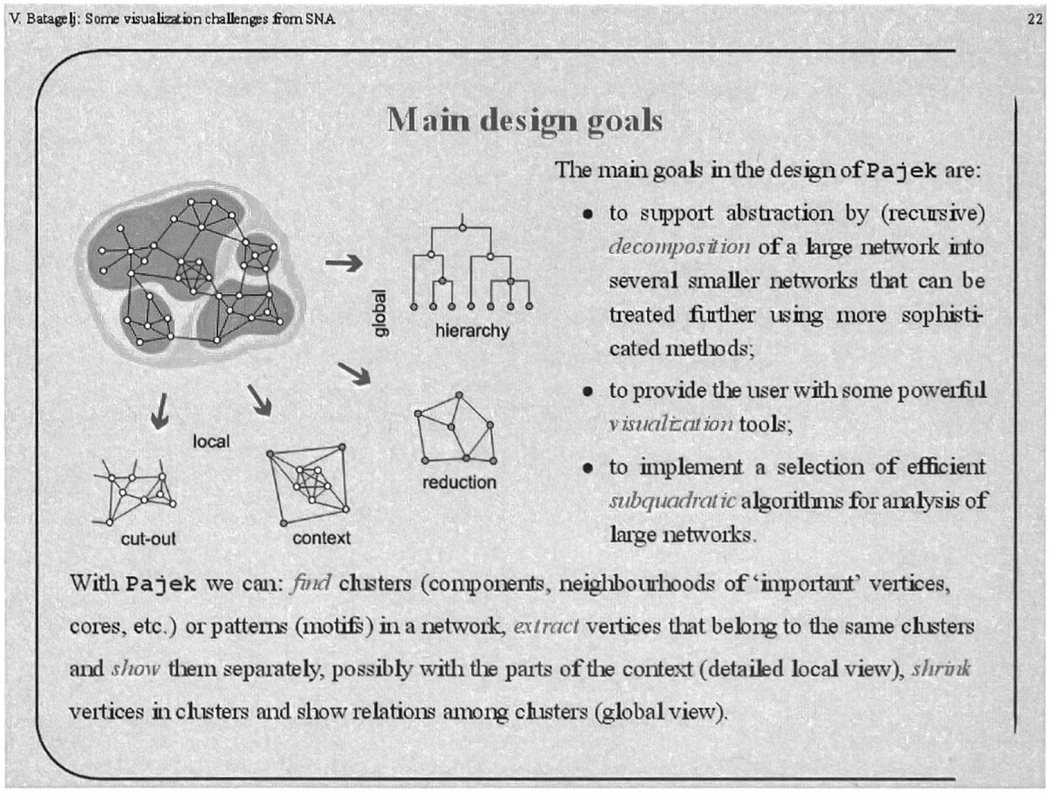


ILLUSTRATION 8
Exploration visuelle d'une structure relationnelle
selon les concepteurs du logiciel *Pajek*
(Source Batagelj, Note 58, p. 22)



Du dessin de graphe à la visualisation de l'information: l'évolution des logiciels de visualisation.

Les multiples usages des dessins de réseaux en font désormais un outil incontournable des études de réseaux sociaux. J. Moody précise ainsi l'apport des visualisations[57]:

« For me, good network images help build our intuition about all those things that make networks special: the ability to see local detail embedded in macro structures, to distinguish intuitively those at the heart of a social system from those at the periphery, or to make clear the unstated schisms that divide social life. It is this ability to provide a richly contextualized micro-macro view that can span multiple dimensions that makes network visualizations worth the space. »

Dans ses fonctionnalités et dans sa philosophie d'utilisation[58], *Pajek* est un des premiers logiciels à donner explicitement à la visualisation un statut à part entière pour l'analyse d'un réseau. Il intègre dès sa création toute une panoplie d'algorithmes de dessin automatique de graphes (circulaire, hiérarchique, modèle de force, valeurs propres...), les outils nécessaires à la manipulation de ces dessins (transformations, édition manuelle, exports vectoriels intégrant des procédures interactives) et un certain nombre de traitements graphiques performants (dessins avec contraintes, calques, *fisheye*, 3D,...). Le principe même de fonctionnement du logiciel est d'offrir la possibilité de visualiser chacun des résultats de l'analyse de la structure du graphe sur le dessin grâce aux différents types d'objets (*partitions, clusters*, *vecteurs* et *hiérarchies*). Les auteurs développent un discours construit et réaliste sur la fonction exploratoire des visualisations, et leurs conclusions anticipent les développements futurs « *A possible answer are interactive layouts where the user controls what (s)he wants to see* ».

Cette démarche exploratoire s'est peu à peu généralisée à l'ensemble des données qui peuvent être associées à une structure relationnelle, notamment les informations sur la nature et les propriétés des objets que cette dernière met en jeu (sommets et liens). Les logiciels récents (*Gephi*, *NodeXL*) proposent désormais des interfaces de gestion de données performantes et intuitives en comparaison de celles de leurs précurseurs *Pajek* et *Ucinet-Netdraw*. Ils permettent notamment d'utiliser de manière simplifiée la composante visuelle du dessin pour construire des figures complexes intégrant ce contexte d'une structure relationnelle. Le rendu visuel des dessins de réseaux peut être grandement amélioré par une gestion fine des attributs graphiques classiques tels que la taille, la forme, la couleur, la texture (discrétisations, combinaisons), mais aussi par l'usage

approprié des labels de sommets ou de liens, la possibilité de jouer sur la transparence ou sur différentes couches d'objets, ou bien encore l'opportunité d'exporter les images sous des formats graphiques vectoriels ouverts. Ces images profitent aussi de fonctionnalités supplémentaires permettant d'optimiser la représentation sous forme de contraintes intégrées dans les algorithmes ou d'algorithmes de post-traitement (placement des labels, non superposition des informations, gestion de l'ordre d'affichage,...). Cet ensemble de détails visuels désormais maîtrisables contribue à rendre les dessins de réseaux « agréables » et font basculer ces représentations dans la sphère de l'art et du *Design*[59].

Les logiciels actuels sont ainsi devenus de véritables outils de cartographie automatisée de réseaux, capables de manipuler des ensembles complexes de données relationnelles et d'en faire des présentations synthétiques scénarisées. Mais plus encore, ils mettent en œuvre les préceptes de la visualisation interactive de l'information définis par B. Shneiderman[60] : « Overview first, zoom and filter, then details-on-demand ». Du dessin de graphe principalement dédié à la communication, on passe ainsi à la manipulation d'images interactives pour guider le plus efficacement possible l'exploration des réseaux sociaux et de leur contexte. De tels outils et procédures peuvent être appliqués plus généralement à toute structure relationnelle, et de ce point de vue, les dessins de réseaux ont acquis un statut analogue aux graphiques statistiques.

Le dessin d'un réseau conserve donc une vraie pertinence en tant que vue générale permettant de se situer et de se déplacer dans la structure relationnelle correspondante. L'efficacité de ce type d'image est plus que jamais recherchée et les algorithmes évoluent en conséquence. Pour améliorer la qualité des représentations et faciliter l'exploration, ces derniers tiennent compte désormais des propriétés de la structure relationnelle et intègrent les contraintes supplémentaires imposées par les exigences de l'interactivité : la rapidité de calcul et la capacité au changement d'échelle (*scalability*) des algorithmes.

L'évolution des algorithmes: intégration des informations structurelles et approche matricielle

L'étude de la structure d'un réseau est aujourd'hui mobilisée de plusieurs façons dans le but de servir efficacement à la production ou à l'exploitation des représentations graphiques.

Certains indicateurs structurels peuvent être considérés comme de véritables aides à la lecture d'un dessin de réseau. Il est souvent utile par exemple d'afficher les centralités de proximité ou d'intermédiarité pour repérer plus facilement quelques sommets importants qui organisent de fait la configuration graphique. De même, les algorithmes de recherche de communauté (modularité) peuvent jouer un rôle similaire, d'autant plus s'ils sont couplés à des configurations obtenues par des algorithmes accentuant les symétries (*Open Ord* dans *Gephi, pivot MDS dans Pajek)*[61].

Les informations structurelles peuvent être directement prises en compte par les algorithmes de dessin de réseau afin d'optimiser la représentation. L'algorithme *Kamada-Kawai* est efficace et rapide pour calculer une représentation de réseau, mais une de ses faiblesses est qu'il est adapté à un réseau constitué d'un seul morceau (graphe connexe). Si la structure du graphe ne respecte pas cette propriété, les configurations de chacune des composantes connexes sont calculées en référence à l'espace global de référence et sont de ce fait enchevêtrées dans la configuration finale qui les rassemble. Pendant longtemps, le chercheur n'avait d'autre solution que de repérer les composantes à l'aide des algorithmes dédiés et à les séparer manuellement sur le dessin. Désormais, les logiciels proposent – directement ou en option – de dessiner automatiquement chacune des composantes connexes dans des espaces (cases) adaptés à leur taille et dont l'assemblage constitue un dessin de réseau final beaucoup plus lisible. Ce modus operandi est valable pour d'autres propriétés structurelles (détection de sous-ensembles de sommets ou recherche de motifs)[62].

Un autre usage des informations structurelles consiste à les prendre comme base pour calcul de la représentation graphique en privilégiant ces contraintes structurelles. Insatisfaite des sociogrammes, M.-L. Northway[63] propose dès 1951 une méthode alternative de représentation des données sociométriques appelée *sociogramme en cible*. Cette figure de réseaux est organisée selon 4 cercles concentriques déterminés en fonction des quartiles de la distribution des degrés des sommets du graphe (choix sociométriques). Les sommets les plus choisis sont placés au centre de la figure. Ensuite, pour améliorer la clarté du graphique, seuls les liens vers les niveaux les plus élevés sont conservés[64]. Certains algorithmes actuels s'inspirent de ce choix de construction comme principe directeur organisant la représentation: les sommets sont assignés dans des « régions »

ILLUSTRATION 9
Configurations d'un réseau générées en tenant compte des différentes mesures de centralité
(Source U. Brandes, Note 29, p. 48)

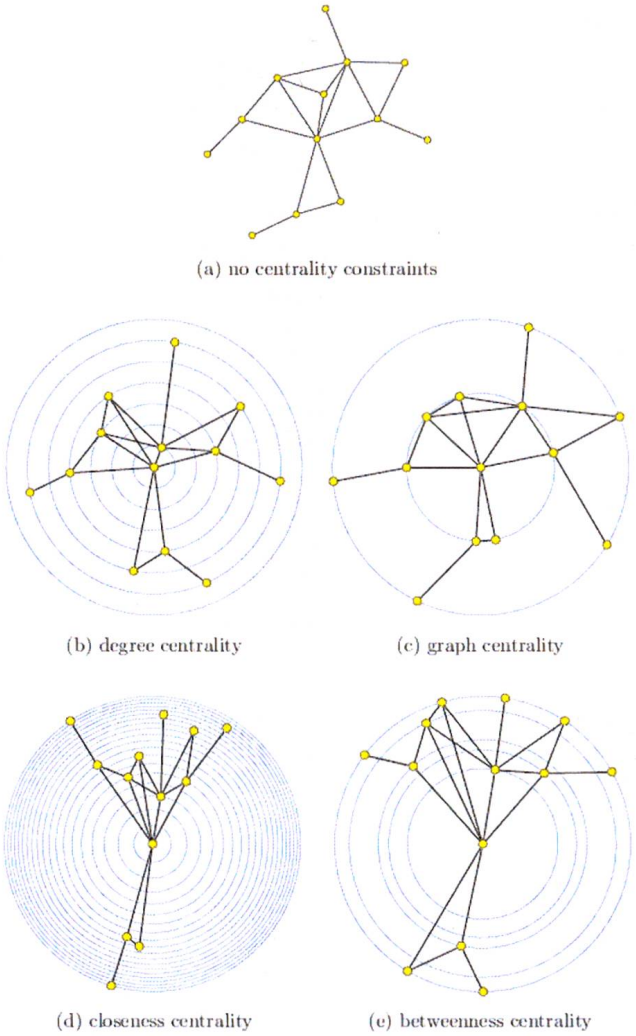
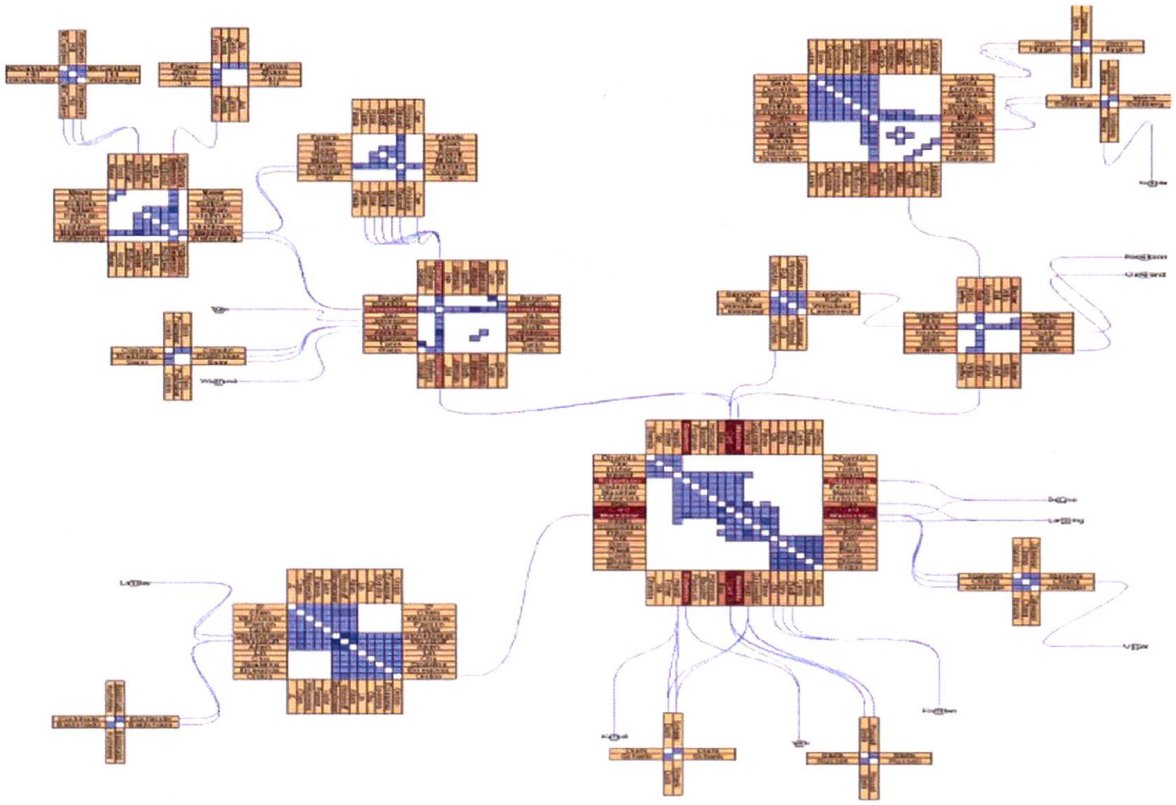


ILLUSTRATION 10
Une représentation hybride d'un réseau conçue avec *NodeTrix*.
(Source Henry et al. , Note 70, pages annexes)



de la figure en fonction de leur score de centralité et leur placement est ensuite optimisé dans cet espace contraint[65]. Un logiciel tel que *Visone* permet de mettre en œuvre ce type d'algorithmes, en privilégiant notamment la centralité de proximité[66]. Un danger demeure toutefois que les indices structurels de l'analyse d'un graphe soient « naturalisés » par leur visualisation, et ne soient plus questionnés en regard des principes de leur construction.

D'autres initiatives proposent des solutions alternatives pour représenter des réseaux sociaux. Estimant que les *sociogrammes* peuvent semer la confusion chez le lecteur dès que le nombre de sommet est grand, Forsyth & Katz[67] lancent un débat sur la visualisation dans la revue *Sociometry* et introduisent une approche matricielle de la visualisation des réseaux. Il s'agit d'utiliser la matrice d'adjacence en tant que représentation graphique à part entière. Les *sociomatrices* ont l'avantage de préserver l'ensemble des données et laissent la possibilité de les présenter de manière ordonnée par un simple réarrangement des lignes et des colonnes. De cette manière, « All the information has equal weight, no relation being obscured by raison of unfortuned placing of individuals. ». Si Moreno persiste à penser que les *sociogrammes* sont plus utiles dès que l'on s'intéresse aux liens indirects et aux structures complexes, il imagine qu'une synthèse des deux formalisations graphiques est possible et serait profitable à tous[68].

L'utilisation de tableaux en tant que représentations graphiques a été développée par les travaux de J. Bertin en sémiologie graphique (matrices-Bertin). Ces pistes sont poursuivies aujourd'hui par J.-D. Fekete et l'équipe Aviz de l'INRIA spécialistes dans la visualisation de l'information et qui dressent un bilan comparatif des deux approches graphiques[69]. Ils proposent des procédures permettant d'obtenir des visualisations matricielles efficaces et ont aussi développé des représentations de réseaux hybrides combinant les deux approches graphiques (*NodeTrix*[70]) : un diagramme nœud-liens organise la figure et des matrices remplacent les groupes de sommets fortement connectés (clusters), ce qui permet de visualiser plus efficacement la nature des connections existant à l'intérieur de ces groupes.

Plus que la visualisation d'un réseau, l'objectif des outils produits par cette équipe est de permettre la navigation interactive au sein de la structure relationnelle : l'approche matricielle se révèle performante (*Matlink)*, surtout lorsqu'elle se conjugue avec les diagrammes nœud-liens (*MatrixExplorer*) alors que d'autres applications facilitent l'exploration des données attributaires associées aux réseaux (*GraphDice*).

Conclusion : Visualiser les interactions pour les comprendre

Bien qu'elles jalonnent de nombreux travaux sur les réseaux sociaux depuis des décennies, les images de réseaux ont eu du mal à passer d'un statut d'objet quasi-exotique à celui d'une représentation de données à part entière, analogue à un tableau ou à une carte. L'évolution du statut de ces images a été grandement facilitée par l'apparition au début des années 1990 des algorithmes par modèle de force qui ont permis une production en série d'images fondées sur des critères esthétiques et respectueuses d'une conceptualisation relationnelle des phénomènes sociaux.

L'application de ces techniques de visualisation à des données relationnelles empiriques a ouvert la voie à une véritable exploration visuelle interactive dont les plus récents logiciels facilitent la mise en œuvre. Débarrassé des contraintes techniques de la production des images et de la manipulation des données, le travail du chercheur peut désormais se concentrer sur les phases de création et de modélisation, ainsi que sur la formulation de questionnements pertinents à soumettre aux données relationnelles – ce qui ne l'exempte pas toutefois d'un apprentissage des outils et d'une connaissance de leurs procédures et postulats.

L'interactivité permet de contrôler ce que l'on veut voir de la structure relationnelle et des données qui lui sont associées et, pour paraphraser U. Brandes, il est alors possible de *construire des explications à travers la visualisation*, sous réserve de respecter les principes de l'excellence graphique[71].

Ainsi, les évolutions constatées depuis les premiers dessins manuels ont placé les dessins de réseaux au sein d'un ensemble conceptuel général de visualisation de l'information qui contribue à leur légitimation et à leur contextualisation. À ce titre, les dessins de réseaux sont un des supports efficaces – parmi bien d'autres – pour permettre l'exploration visuelle de l'information contenue dans des données nativement complexes et pluridimensionnelles.

1 Linton C. Freeman, Visualizing social networks, in: Journal of Social Structure, 1, 2000.

2 Ce texte a été élaboré à partir de diverses communications: journée d'étude «La représentation graphique des réseaux» (EHESS-INED, 2005) et les écoles d'été: «Réseaux sociaux: enjeux, méthodes, perspectives» (CNRS, 2008), «Étudier les réseaux sociaux» (CNRS, 2012); «Analyse des réseaux sociaux» (QuantiLille, 2013).

3 Alden S. Klovdahl, A note on images of networks, in: Social Networks, 3, 1981, pp. 197–214.

4 Voir David Knoke, James H. Kuklinski (Eds.), Network analysis (Quantitative applications in the social sciences, 28), Beverly Hills 1982; John Scott, Social Network Analysis, London, 1991; Alain Degenne, Michel Forsé, Les réseaux sociaux, Paris 1994.

5 Un des premiers programmes dédié à la visualisation des réseaux produit à la fin des années 1980. Cf. http://www.andrew.cmu.edu/user/krack/krackplot.shtml (dernière consultation 2/10/2014).

6 Le Journal of Social Structure (JoSS) est une revue électronique (http://www.cmu.edu/joss) associée à l'International Network for Social Network Analysis (INSNA).

7 Jim Moody, "Welcome ! An introduction to the JoSS Visualization Symposium 2010", June 23, 2010. Cf. http://www.cmu.edu/joss/content/issues/vizsymposium.html (dernière consultation 2/10/2010).

8 Les derniers manuels publiés par la communauté des analystes de réseaux comportent désormais des parties spécifiquement dédiées à la visualisation des réseaux. Cf. John G. Scott, Peter J. Carrington (Eds.), The SAGE handbook of social network analysis, London 2011; Marina Hennig, Ulrik Brandes, Jürgen Pfeffer, Ines Mergel, Studying Social Networks. A Guide to Empirical Research, Frankfurt et New York 2012.

9 Linton C. Freeman, Social network visualization, methods of, in: Robert A. Meyers (Ed.), Encyclopedia of complexity and systems science, New York, 2009, pp. 8345–8363; Nathalie Henry, Jean-Daniel Fekete, Représentations visuelles alternatives pour les réseaux sociaux, in: Réseaux, 26 (152), 2008, pp. 59–92.

10 Manuel Lima, Visual complexity. Mapping patterns of information, New York 2011.

11 Weiwei Cui, A survey on graph visualization, 2010, http://www.citeulike.org/group/1986/article/8480546 (dernière consultation 2/10/2014); Sébastien Heymann, Bénédicte Le Grand, Graph Viz 101. a blog post series on the visual exploration of graphs, http://linkurio.us/graph-viz-101/ (dernière consultation 2/10/2014); Françoise Bahoken, Laurent Beauguitte, Serge Lhomme, La visualisation des réseaux. Principes, enjeux et perspectives, 2013, http://halshs.archives-ouvertes.fr/FMR/halshs-00839905 (dernière consultation 2/10/2014).

12 Vladimir Batagelj, Wouter de Nooy, Andrej Mrvar, Exploratory social setwork analysis with Pajek, Cambridge 2005. Pour une revue des outils actuellement utilisés en SHS, voir P. Mercklé, Des logiciels pour l'analyse des réseaux, Quanti-Lille 2013, http://quanti.hypotheses.org/845/ (dernière consultation 27/6/2013).

13 Certains sont apparus au début des années 2000: *Inflow, Netminer, Aisee,...*

14 Par exemple, *GraphVis*. On trouve en France plusieurs outils: *Tulip* (données relationnelles), *Pigale* (graphes planaires), et les outils développés par Jean-Daniel Fekete et l'équipe Avis à l'INRIA (*MatrixExplorer, NodeTrix, GraphDice*).

15 Lothar Krempel, Network visualization, in: John G. Scott, Peter J. Carrington (Eds.), The SAGE handbook of social network analysis, London 2011, pp 558–577.

16 Norbert Elias, Qu'est-ce que la sociologie?, Paris 1970.

17 Linton C. Freeman, The development of social network analysis: A study in the sociology of science, Vancouver 2004; Maurizio Gribaudi (dir.), Espace, temporalités, stratifications, exercices sur les réseaux sociaux, Paris 1998.

18 Par exemple Maurizio Gribaudi, Alain Blum. Des catégories aux liens individuels: l'analyse statistique de l'espace social, in: Annales. Économies, Sociétés, Civilisations, 45, 1990, pp. 1365–1402.

19 Stefan Bornholdt, Heinz Georg Schuster (Ed), Handbook of Graphs and Networks: From the Genome to the Internet, New York 2003.

20 Cf. Mark E. J. Newman, Networks. An introduction, Oxford 2010.

21 Roberto Tamassia (Ed.), Handbook of graph drawing and visualization, London 2013.

22 Jean-Daniel Fekete, Visualiser l'information pour la comprendre vite et bien, in: ADBS éditions (Ed.), L'usager numérique, 2010, pp. 161–194.

23 Jacques Bertin, Sémiologie graphique. Les diagrammes – les réseaux – les cartes, Paris 1967, p. 8.

24 Edward Tufte, The visual display of quantitative information, Cheshire 1983.

25 Jacob L. Moreno, Who Shall Survive?, Washington, DC 1934. Voir aussi Jacob L. Moreno, Sociogram and sociomatrix. A note to the paper by Forsyth and Katz, in: Sociometry, 9, 1946, 348–349.

26 Cf. Freeman (Note 1).

27 C'est le cas de *Structure*, produit par R. Burt, qui à cette époque est emblématique de la *Structural Network Analysis*.

28 Distances euclidiennes, covariances, similarités, dissimilarités...

29 Ulrik Brandes, Layout of graph visualizations, Thèse, Université de Constance, Constance 1999.
30 John F. Padgett, Christopher K. Ansell, Robust action and the rise of the Medici, 1400-1434, in: American Journal of Sociology, 98, 1993, pp. 1259–1319.
31 Malcolm K. Sparrow, The application of network analysis to criminal intelligence. An assessment of the prospects, in: Social Networks, 13, 1991, pp. 251–274.
32 Cf. Bertin (Note 23) et Brandes (Note 29).
33 Cf. Fekete (Note 22). Nous reprenons ici le vocabulaire des informaticiens et théoriciens des graphes qui permet de distinguer clairement ces figures en regard d'autres types de représentation de données relationnelles. Voir aussi Jean-Daniel Fekete, Mohammad Ghoniem (EMN), Mise à jour de l'état de l'art sur les techniques de visualisation pour l'analyse visuelle de phénomènes dynamiques, Nantes 2003.
34 Cf. Bertin (Note 23), p. 269.
35 Corey Kosak, Joe Marks, Stuart Shieber, Automating the layout of network diagrams with specified visual organization, in: IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 24, 1994, 440–454; Chaomei Chen, Information visualization. Beyond the horizon, London 2006.
36 Ulrik Brandes, Drawing on physical analogies, in: Michael Kaufmann, Dorothea Wagner (Eds.), Drawing graphs. Methods and models, Berlin 2025, 2001, 71–86; Stephen G. Kobourov, Spring embedders and force directed graph drawing algorithms, 2012. http://arxiv.org/abs/1201.3011v1 (dernière consultation 2/10/2014).
37 Maurizio Gribaudi, Andrei Mogoutov, Social stratification and complex systems. A model for the analysis of relational data, in: Kevin Schurer, Herman Diederiks (Eds), The use of occupations in historical analysis, Göttingen 1993.
38 Maurin Nadal, Guy Melançon, Dessin de graphe assisté par un algorithme génétique, in: 9ème édition de la conférence MAnifestation des JEunes Chercheurs en Sciences et Technologies de l'Information et de la Communication – MajecSTIC 2012, 2012.
39 Kobourov (Note 33).
40 Vladimir Batagelj. Andrej Mrvar, Pajek Workshop, in: Sunbelt XXIX, San Diego, CA 2009.
41 Cathleen McGrath, Jim Blythe, David Krackhardt, The effect of spatial arrangement on judgments and errors in interpreting graphs, in: Social Networks, 19, 1997, p. 223–242.
42 Weidong Huang, Seok-Hee Hong, Peter Eades, Layout effects: comparison of sociogram drawing conventions, Sydney 2006.
43 Ulrik Brandes, Why everyone seems to be using spring embedders for network visualization, and should not. Keynote address, Pacific Visualization Symposium (PacificVis), 2011 IEEE.
44 Pour une revue de ces algorithmes voir Stefan Hachul, Michael Jünger, An experimental comparison of fast algorithms for drawing general large graphs, in: Proc. Graph Drawing, 2006, pp. 235–250.
45 David Harel, Yehuda Koren, Graph drawing by high-dimensional embedding, in: Proc. Graph Drawing, 2002, pp. 207–219.
46 Björn-Olav Dozo, Données biographiques et données relationnelles, in: COnTEXTES, 3, 2008; Duval Julien, «L'analyse des correspondances et la construction des champs, in: Actes de la recherche en sciences sociales, 5, Paris 2013, pp. 110-123.
47 Claire Lemercier, Paul-André Rosental, « Pays » ruraux et découpage de l'espace. Les réseaux migratoires dans la région lilloise au milieu du XIXe siècle. Population, 55, 2000, pp. 691–726.
48 Cf. https://gephi.org/users/publications/ (dernière consultation 2/10/2014).
49 H. Millet, Un réseau international d'ermites et de réformateurs en quête d'une nouvelle spiritualité dans la seconde moitié du XIVe siècle, in: Henri Bresc, Fabrice d'Almeida, Jean-Michel Sallmann (Eds.), La circulation des élites européennes. Entre histoire des idées et histoire sociale, Paris 2002, p. 100–122.
50 Mark S. Granovetter, The strength of weak ties, in: The American Journal of Sociology, 78, 1973, pp. 1360–1380; Elizabeth Bott, Urban Families: Conjugal Roles and Social Networks, Human Relations, 1955; 8(4):345.
51 Padgett, Ansell (Note 30).
52 Maurizio Gribaudi, Les discontinuités du social. Un modèle configurationnel, in: Bernard Lepetit (dir.), *Les formes de l'expérience. Une autre histoire sociale*, Paris 1995.
53 Alain Cottereau, Mokhtar Mohatar Marzok, Une famille andalouse. Ethnocomptabilité d'une économie invisible, Paris 2011.
54 Carola Lipp, Lothar Krempel, Petitions and the social context of political mobilization in the revolution of 1848/49. A microhistorical actor-centred network analysis, in: International Review of Social History, 46, 2001, pp. 151–169; Lothar Krempel, Michael Schnegg, Exposure, networks, and mobilization. The petition movement during the 1848/49 revolution in a German town, 1999, voir: http://www.mpi-fg-koeln.mpg.de/~lk/netvis/exposure/mobv5.html (dernière consultation 2/10/2014).

55 Cf. http://ateliercartographie.wordpress.com/ (dernière consultation 2/10/2014).
56 Gribaudi (Note 17); Claire Bidart, Alain Degenne, Michel Grossetti, La vie en réseau. Dynamique des relations sociales, Paris 2011, 356 p.
57 Moody (Note 7)..
58 Vladimir Batagelj, Some visualization challenges from SNA. Workshop at GD' 05, Limerick, Ireland 2005.
59 Lina (Note 10).
60 Ben Shneiderman, The eyes have it. A task by data type taxonomy for information visualizations, in: Proceedings 1996 IEEE Symposium on Visual Languages, 1996, pp. 336–343.
61 Shawn Martin, W. Michael Brown, Richard Klavans, Kevin W. Boyack, OpenOrd. An open-source toolbox for large graph layout, in: Proceedings SPIE Conference on Visualization and Data Analysis (VDA), San Francisco Ariport 2011; Vincent D. Blondel, Jean-Loup Guillaume, Renaud Lambiotte, Etienne Lefebvre, Fast unfolding of communities in large networks, in: Journal of Statistical Mechanics, 2008, P10008.
62 Nadal, Melançon, (Note 35); Ben Shneiderman, Cody Dunne, Interactive network exploration to derive insights: filtering, clustering, grouping, and simplification, in: Proceedings of the 20th international conference on Graph Drawing, Redmond 2013, pp. 2-18.
63 Mary L. Northway, A method for depicting social relationships obtained by sociometric testing, in: Sociometry, 3, 1940, pp. 144–150.
64 À la suite de multiples critiques cette dernière règle sera abandonnée au profit d'une différenciation visuelle des liens permettant de conserver toute l'information relationnelle.
65 Krempel (Note 15).
66 Ulrik Brandes, Jörg Raab, Dorothea Wagner, Exploratory network visualization. Simultaneous display of actor status and connections, in: Journal of Social Structure, 2, 2001.
67 Elaine Forsyth, Leo Katz, A matrix approach to the analysis of sociometric data, in: Sociometry, 9, 1946, pp. 340–347, p. 344.
68 Jacob L. Moreno, Sociogram and sociomatrix. A note to the paper by Forsyth and Katz, in: Sociometry, 9, 1946, pp. 348–349.
69 Henry, Fekete (Note 9).
70 Nathalie Henry, Jean-Daniel Fekete, Michael J. McGuffin, NodeTrix. A hybrid visualization of social networks, in: IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 13, 2007, 1302–1309.
71 Ulrik Brandes, Patrick Kenis, Jörg Raab, Explanation through network visualization, in: Methodology. European Journal of Research Methods for the Behavioral and Social Sciences, 2, 2006, pp. 16–23.