

---

# Visualisation de Systèmes d'Information Complexes

Une approche par « points de vue étendus »

**D. Bihanic** \*, **T. Polacsek** \*\*

\* PRES Lille Nord de France, Laboratoire CALHISTE (Université de Valenciennes)  
Le Mont-Houy, 59313 Valenciennes Cedex 9  
david.bihanic@univ-valenciennes.fr

\*\* Département Traitement de l'Information et Modélisation (ONERA)  
2, avenue Édouard Belin, 31055 Toulouse  
thomas.polacsek@onera.fr

---

**Résumé.** Si les approches modulaires, à base d'objets, de composants ou de services proposent des solutions efficaces (côté "système") pour faire face à la complexité croissante des Systèmes d'Information, celles-ci présentent aujourd'hui d'importants problèmes de « traitement » (côté "utilisateur"). De telles difficultés, renvoyant aux "limites" des méthodes et techniques classiques de représentation et de visualisation de données à l'écran, obligent dès lors à définir d'autres approches et logiques de conception du traitement visuo-graphique de l'information partant de la modélisation conceptuelle, logique et opérationnelle à la consultation-lecture « client ». Fort d'un dialogue « design-ingénierie », nous présenterons une approche originale de représentation-visualisation de données complexes (sur les métiers, processus et structures organisationnelles) reposant sur la composition et génération de « points de vue étendus ». Par là, nous montrerons comment le "monde" de la modélisation peut tirer avantage de la création de vues et points de vue à partir de modèles existants définis dans des langages de modélisation conformes au standard « Meta-Object Facility » (type UML/SysML).

**Mots-Clés :** Système d'information complexe, visualisation de données complexes, « point de vue étendu », vision sémantique.

---

## 1. Introduction

La maîtrise des Systèmes d'Information Complexes (SIC) représente aujourd'hui l'un des principaux défis pour l'informatique [NFG<sup>+</sup>06] ; parce que les organisations cherchent de plus en plus à modéliser l'ensemble de leurs métiers et processus associés, parce que la masse des données stockées et manipulées ne cesse de croître et parce que les Systèmes d'Information s'avèrent, en pratique, de plus en plus hétérogènes, il est indispensable de construire de nouveaux modèles dédiés à la manipulation et au traitement de « très grands systèmes ». Seulement, ces modèles sont devenus, à leur tour, trop complexes pour être simplifiés de manière appréhendable (et compréhensible) par leurs concepteurs [GAE05].

Fort de l'élaboration d'une démarche de recherche conjointe (ici interdisciplinaire) « design et ingénierie », nous proposons, au sein de cet article, de présenter une nouvelle approche de représentation et visualisation de données complexes reposant sur la composition de vues utilisateur au travers de la construction (dynamique) et génération de plusieurs points de vue « associés », lesquels offrent alors une perception des données en fonction du contexte d'emploi/usage et conséquemment un meilleur cadre de traitement. De là, il est possible de produire, c'est-à-dire de construire et d'associer dynamiquement, divers points de vue du système que nous qualifions « de points de vue étendus », lesquels (alors sémantiquement cohérents) rendent compte d'une perception maîtrisée (adaptée au profil d'emploi/usage utilisateur) de larges ensembles de données complexes. Cette approche offre ainsi plusieurs alternatives de représentation, de visualisation mais également d'interaction avec les données pour une meilleure gestion du tissu informationnel complexe des Systèmes d'Information.

Cet article est organisé de la façon suivante : la section 2 signale les problèmes aujourd'hui rencontrés en matière d'ingénierie des Systèmes d'Information Complexes (complexification), pointant par là les principaux verrous qu'il convient dorénavant de lever ; la section 3 fait le point sur les recherches menées jusqu'alors dans le domaine de la visualisation d'information et introduit de nouvelles avancées/perspectives issues d'une démarche de design d'information (en faveur de la for-

mation d'un autre paradigme de création de langage de représentation visuo-graphique) ; enfin, la section 4 présente les enjeux et bénéfices de l'approche par « points de vue étendus ».

## 2. De l'ingénierie des SIC : vers une complexification

### 2.1. Les Systèmes Complexes (aspects définitionnels)

Puisqu'aucune définition unique ne saurait valoir pour l'ensemble des systèmes complexes existants (eu égard à une très grande variété typologique), nous proposons de considérer qu'un système complexe est un système qui possède tout ou partie des propriétés suivantes :

- **L'hétérogénéité**, un système complexe est généralement composé de plusieurs entités ou agents. Ces entités sont souvent de plusieurs types et possèdent une structure interne particulière,

- **Le traitement de flux**, les différents éléments du système ayant des relations ou des interactions entre eux, renvoyant à la production de données d'environnement<sup>1</sup>,

- **La taille**, bien que cela ne soit pas une caractéristique fondamentale, la taille d'un système, et donc des traitements qui lui sont associés, peut être une caractéristique de la complexité,

- **La hiérarchisation**, il existe des niveaux hiérarchiques qui forment des réseaux interdépendants comprenant les éléments ou les agents qui vont interagir,

- **L'évolution**, les systèmes complexes répondent aux mécanismes de causalité circulaires, renvoyant à l'existence de rétroactions des comportements collectifs et à des propriétés émergentes<sup>2</sup>.

Dès lors, tout système complexe, qu'il renvoie à un écosystème d'organismes vivants, à une organisation d'une communauté urbaine ou bien à une structure d'acteurs en entreprise<sup>3</sup>, se voit défini au travers

---

1. Ces éléments vont collectivement modifier leur environnement, lequel les contraint et modifie en retour leurs états ou comportements initiaux.

2. Il est à noter que le fait de connaître les propriétés et le comportement des éléments isolés d'un système complexe ne constitue pas une information suffisante pour prédire le comportement global du système.

3. Cf. les Systèmes d'Information Complexes (SIC).

de ses spécificités et propriétés environnementales, c'est-à-dire par rapport aux données du contexte ou du champ d'interaction des acteurs ou éléments en présence.

## **2.2. Une multiplicité de processus (source de complexité)**

Il peut sembler trivial de rappeler que le but d'un Système d'Information (SI) est d'organiser, de structurer l'information. Aussi, par le terme « information », il faut entendre à la fois « les données » mais également « les processus » par lesquels ces-dernières sont traitées et donc architecturées. C'est pourquoi aucune base de connaissances ne se limite plus aujourd'hui au stockage d'informations. Toutes y sont également structurées, hiérarchisées, liées entre-elles et incluses au sein de processus applicatifs qui les mettent en coopération. A ces informations s'ajoutent également des méta-informations permettant de les caractériser, de les indexer. Profitant de telles extensions, l'entreprise entend dorénavant modéliser l'ensemble de ses métiers et processus associés engageant l'édiction de règles de manipulation de données au moyen de "workflow"<sup>4</sup>, de règles métier<sup>5</sup> ou bien encore de techniques de modélisation de processus. L'entreprise toute entière se voit alors représentée au travers de modèles proposant d'interopérer, par exemple, la gestion du cycle de vie des produits avec le Contrôle Qualité en passant par la gestion des Ressources Humaines. Aussi, pour pallier les nombreuses difficultés induites, l'Ingénierie des Modèles (IdM) [Gro03][Fra02] définit des langages de modélisation ainsi que les transformations qui s'appliqueront tout au long des processus de l'entreprise. Toutefois, si le recours à des modèles présente des avantages indéniables, il convient de nuancer un tel apport. Les approches de modélisations ont certes permis une première simplification, mais elles ont par ailleurs défini un cadre d'où s'originent deux autres formes de complexité : celle liée à

4. On appelle "workflow", la modélisation et la gestion informatique de l'ensemble des tâches à accomplir et des différents acteurs impliqués dans la réalisation d'un processus métier (aussi appelé processus opérationnel ou bien procédure d'entreprise).

5. Les règles métier (ou règles de gestion, ou "business rules" en anglais) sont des déclarations de haut niveau structurées, qui permettent de contraindre, contrôler et influencer un aspect du métier.

l'accroissement de la taille de modèles manipulés et celle liée à la complexité des langages qui permettent de définir ces modèles.

### **2.3. Une augmentation de l'hétérogénéité des systèmes**

Si la plupart des systèmes d'information se voient aujourd'hui constitués d'un ensemble d'applications interreliées partageant différents processus et informations, cette interrelation reste encore mal maîtrisée, tant du point de vue de l'architecture que des données traitées, encourageant prioritairement des problèmes de structuration et donc d'identification des informations entre applications. Les métadonnées pouvant se trouver quelquefois absentes pour certaines applications, il en résulte différents niveaux de qualité, et donc de performance des applications d'un même système. De plus, la sémantique d'une information pouvant varier fortement d'une application à une autre, il s'ensuit également de nombreux écarts entre les vues et points de vue des différents utilisateurs. Par là, il faut comprendre que le SI, trouvant dans bien des cas à répartir efficacement plusieurs quantités de données, ne peut parvenir seul à régler l'hétérogénéité de l'entreprise. Autrement dit, il serait illusoire de penser que le SI puisse permettre un jour d'*aplanir* l'entreprise (homogénéisant ainsi ses raccordements/ramifications de services et autres composantes), d'autant que cette hétérogénéité se voit renforcée par une multipolarisation croissante de l'activité économique.

Une des premières causes de cette hétérogénéité est probablement historique. En effet, les besoins de traitement informatique dans l'entreprise n'ont cessé d'augmenter de manière exponentielle obligeant alors une plus grande réactivité au détriment d'une bonne maîtrise du changement. C'est pourquoi, la plupart des entreprises ont fait le choix de développer des solutions spécifiques obviant ainsi de mener des opérations de refonte totale de leur SI. A cela, il convient d'ajouter d'autres raisons propres à la vie de l'entreprise : fusions, acquisitions et transformations successives couplées aux nombreuses extensions de la sphère métier, autant d'éléments contingents à l'origine de problèmes souvent insolubles. Qu'il s'agisse d'une multiplication des SI ou bien encore d'applications en doublon pour un même métier, tous ces accidents, par effet de collision, sont évidemment source d'hétérogénéité due ici à une

couverture “élargie” de l’entreprise autant qu’au climat de changement qui y règne.

L’un des cas les plus triviaux reste probablement celui de bases de données administrant les mêmes sources/unités d’un point de vue sémantique mais ne disposant pas des mêmes informations associées (ces informations pouvant s’avérer parfois contradictoires). Si les conflits de formats de données peuvent, dans une telle situation, être technologiquement solutionnés, il n’en reste pas moins qu’en dépit d’efforts considérables pour une interopérabilité des systèmes, les divergences et contradictions sémantiques perdurent.

#### **2.4. Une surabondance d’informations (« infobesité »)**

L’augmentation progressive des capacités de stockage couplée à l’accélération des possibilités de traitement de l’information des ordinateurs n’ont fait qu’encourager la volonté d’informatiser les processus de l’entreprise. Aujourd’hui, il n’existe plus aucun service de l’entreprise dont les données ne soient pas stockées et traitées par le SI. Par là, il s’agit de constituer, d’alimenter une « mémoire d’entreprise » pour une analyse des actions passées en préparation ou prévision d’actions futures (entrant là au sein d’un processus de capitalisation du savoir et des connaissances acquises). Seulement, cette démarche occasionne une inévitable surabondance ou surcharge d’informations (“information overload”). Outre les problèmes proprement matériels que pose cette accumulation de données (comme la multiplication des serveurs de stockage), des problèmes jusqu’ici contingents au monde de l’Internet apparaissent tels que : comment trouver l’information pertinente ? A cela s’ajoutent d’autres problèmes, liés davantage à l’univers de l’entreprise, comme par exemple : comment gérer une modification d’un modèle métier ou d’un processus ? Comment rendre compte, traduire l’impact de cette modification sur les données elles-mêmes ? Les solutions présentes sur l’Internet sont maintenant appliquées dans l’entreprise, qu’il s’agisse de l’usage de moteur de recherche ou bien encore de cartographie d’informations. L’utilisation croissante de méta-informations, marquant une transition entre une recherche de données et une recherche de connaissances au travers de ce que l’on appelle aujourd’hui le « web

sémantique », n'est que l'expression du besoin de faire face à cette « infobésité ». A la notion de pertinence de l'information doit s'accorder aujourd'hui plus que jamais celle de son emploi. Par conséquent, le recours à des vues et points de vue aménagés, par profil notamment, s'avère indispensable en vue d'assurer un meilleur traitement de l'information. Aussi, pour une même information, il convient d'adapter différents niveaux de détails selon l'usage qui en est fait. Dès lors, si des technologies de transformation de données existent pour un changement de granularité mais également d'univers ontologique, il n'en demeure pas moins que ces approches restent aujourd'hui encore circonscrites dans leurs usages.

Nous examinerons plus avant, au prochain chapitre, quels sont les apports des diverses recherches (conceptuelles et appliquées) en matière de visualisation d'information et d'interaction avancée, précisément pour la représentation-visualisation de données complexes. Enfin, nous nous arrêterons plus particulièrement sur ce qui fonde la nouveauté et « plus-value » d'une démarche de design (« datadesign »).

### **3. La visualisation de données complexes**

#### **3.1. De la visualisation scientifique à l'InfoVis**

Depuis une trentaine d'années, plusieurs laboratoires en sciences informatiques, spécialisés dans la relation et la communication dialogique Homme-Système, ont engagé d'importants programmes de recherche visant principalement l'élaboration de nouvelles solutions de représentation, de description de l'information et de la connaissance. La plupart des études et expérimentations menées dans ce sens aboutirent à la mise en œuvre de méthodes, de techniques et de procédés de représentation liés, rapportés à certaines finalités d'usages ou visées pratiques spécifiques ayant trait principalement à la représentation de données scientifiques d'ordre métrique ou bien encore statistique [Tuf83] [Tuf90] [Tuf97] [Tuk77] [CCKT83] [Cle85] [Cle93] [CM88]. La visualisation se voit alors considérée comme un outil permettant, d'une part, de manipuler un grand nombre de données et, d'autre part, de voir (ici de constater) des phénomènes issus de ces données.

Dès lors, seule une fraction isolée, et par là non significative, de ces travaux de recherche [STT81] [Woo84] [CMS99] fut appuyée, relayée par l'étude experte de représentation cognitive des données<sup>6</sup>, renvoyant à l'analyse de l'ensemble des processus de traitement d'information (démarche holiste, ensembliste examinant une pluralité de situations, d'activités et relativement une multitude de contextes de tâche). Autrement dit, bien qu'ayant contribué à l'amélioration des modalités de traitement<sup>7</sup>, la majorité de ces développements n'ont pas intégré l'étude du fonctionnement des systèmes cognitifs (humain et artificiel) et de leurs interactions, et par là de toute possibilité d'adaptation du cadre-milieu [Le196] de traitement opératoire (en faveur d'une meilleure écologie cognitive).

### 3.1.1. Visualiser la complexité

Ce n'est réellement que depuis une quinzaine d'années, qu'une telle réflexion et démarche "croisée" se voit soutenue par l'élaboration d'approches globales multi-expertes visant la création de représentations graphiques de l'information (InfoVis), lesquelles font se rencontrer notamment ingénierie informatique et psychologie comportementale/sciences cognitives (ingénierie de la cognition). Pour [CMS99], « la visualisation est l'utilisation de représentations visuelles interactives et informatisées de données abstraites pour amplifier la cognition » ; en ceci, elle vise prioritairement un « gain cognitif ». Plus qu'un outil<sup>8</sup>, la visualisation renvoie dès lors à la création d'espaces (ou environnements) formels<sup>9</sup> d'où il devient possible de *percevoir* (et d'*apercevoir*<sup>10</sup>) de nouvelles relations de sens et de signification<sup>11</sup> entre les données (dynamique du sens traduisant la complexité des phénomènes). En d'autres termes, elle offre de transformer la structure des données, ainsi que les espaces qu'elles occupent, en des formes visuelles "utiles". Parmi les principaux initiateurs d'une telle démarche, on compte notamment (outre les

---

6. En faveur du développement de systèmes de représentation-visualisation de données structurellement (sémantiquement) et cognitivement cohérents.

7. En référence aux nombreuses modalités opératoires Homme-Système.

8. En référence à la réalisation de graphiques scientifiques.

9. Donnant forme aux données (souvent abstraites).

10. Renvoyant ici à l'acte de concevoir intellectuellement.

11. En référence au champ de relations sémantiques et non plus seulement structurales des données.

auteurs précédemment cités) George G. Robertson, John Stasko, James D. Hollan, Edwin Hutchins ou bien encore George W. Furnas, également divers laboratoires rattachés au centre de recherche Xerox PARC (Palo Alto), à l'Université de Californie (San Diego)<sup>12</sup>, à l'Université de Maryland, à l'institut technologique Georgia (Georgia Tech)<sup>13</sup>, à l'Université d'Etat de Virginie (Virginia Tech)<sup>14</sup>, aux laboratoires d'IBM, de AT&T et Bell, etc.

### 3.1.2. Arbres, cartes et paysages de données

Si la visualisation tend à « amplifier la cognition » via la perception (et ce par l'entremise de l'expression formelle des liaisons sémantiques entre les données), celle-ci se base sur l'édition de différentes « techniques » associant un modèle à une représentation visuo-graphique. De ces techniques (adaptant, interfaçant différents corpus de données) dépend le mode de raisonnement (et conséquemment de traitement : vues et points de vue offerts à l'utilisateur) sur les données. Chacune d'entre elles offre de présenter, d'*exposer*, sous des “abords” (ou entrées) différent(e)s, la complexité à la fois structurelle et sémantique des données (et leurs relations induites), laquelle évoluera selon des variables de quantité (impédance) et de qualité (pertinence). Elles définissent, pour ce faire, des règles d'organisation et de présentation formelles des données et mettent en œuvre des procédés d'exploration multi-niveaux combinant plusieurs modes de structure/lecture – ces procédés rendent compte d'une articulation entre les dispositions des données, les réalités sémiotiques et les modalités d'appropriation (de traitement) par l'utilisateur.

Trois grandes familles de techniques de représentation des données sont communément référencées : les arbres (a.), les cartes (b.) et les paysages (c.) de données.

- (a.) Représentation hiérarchique des données (relations d'héritage),
- (b.) Représentation réticulaire des données (relations sémantiques),

12. Comprenant le laboratoire de cognition distribuée et d'interaction Homme-Machine dirigé par James D. Hollan et Edwin Hutchins.

13. Hébergeant le centre de visualisation et d'usabilité.

14. Accueillant le laboratoire de visualisation et d'évaluation de l'information de l'institut polytechnique.

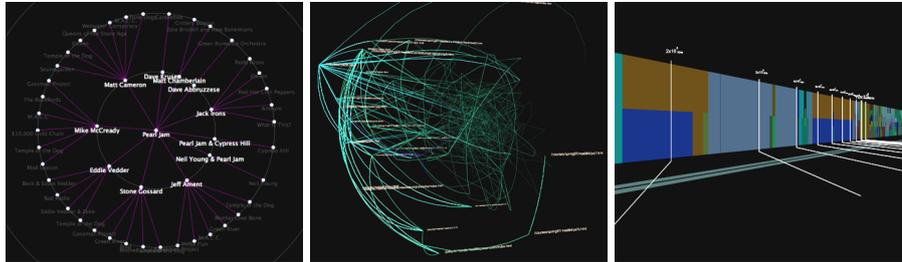


Figure 1 – Les trois familles de représentation : (a.), (b.), (c.)

(c.) Représentation planaire<sup>15</sup> des données (séquences logico-temporelles de relations).

De ces trois familles, renfermant chacune diverses variations, adaptations et déclinaisons techniques (les arbres circulaires “circular trees” [CTM<sup>+</sup>06], les arbres fractals “fractal trees” [KY93], les cartes d’arborescence “treemaps” [Shn92], les arbres coniques “cone-trees” “cam-trees” [RMC91] “multi-trees”, les arbres hyperboliques “hyperbolic trees” [LRP95] [MHCF96], des paysages de données (“datascapes”) au “datamountains” [RCL<sup>+</sup>98] [CDRH99] etc.) lesquelles peuvent emprunter plusieurs dimensions (1D, 2D, 3D, nD), il ressort différents types de variables (nominales, ordinales, quantitatives, etc.), d’interactions (filtrage, sélection/détails, navigation, “linking/brushing” [BMMS91], etc.) et également de tâches (« globaliser », fouiller/chercher, trier, croiser/mettre en relation, etc.).

Si la plupart de ces techniques (ainsi référencées) présentent de nombreux avantages, notamment en matière de représentation (spatiale et/ou temporelle) multi-échelle des données (de leurs correspondances), de description visuelle des fonctions opératrices ainsi que de régulation de la charge mentale mobilisée (évitant toute désorientation et/ou surcharge cognitive), celles-ci se révèlent aujourd’hui proprement « inadaptées » à la représentation de grands ensembles de données complexes. Cette limitation est due au fait qu’elles reposent essentiellement sur une relation perceptivo-cognitive de type « métaphorique » (relation initiée, en un sens, par [Eng68]). En effet, en dépit de leur grande va-

15. Cf. graphe planaire (théories des graphes).

riété, ces techniques, qu'elles adaptent ou non des vues et points de vue métaphoriques<sup>16</sup>, reposent majoritairement sur une représentation métaphorique cognitive : « métaphore cognitive » [LJ80] [Sin93] ; cette métaphore (bien qu'elle ne fasse intervenir aucun sens figuré) est le résultat d'une corrélation de deux « systèmes », soit par référence (métaphore in praesentia, fonctionnant par comparaison) soit par analogie (métaphore in absentia, fonctionnant par association) : l'un renvoie au « système primaire » (cadre technique) et l'autre au « système secondaire » (cadre exogène, soit référent ou analogue).

Or, face aux récents besoins de représentation d'importants volumes de données complexes, il ressort [Col04] [Poy02] qu'une telle relation métaphorique s'accompagne de nombreuses "limitations". La première renvoie à la nécessité d'une corrélation (ou imbrication) absolue, « complète » des systèmes primaires et secondaires (par référence comme par analogie), laquelle dépend des correspondances possibles entre les éléments « métaphorisés » et « non-métaphorisés (relation d'auxiliarité). Ainsi, eu égard à un tel rapport d'implication, il ne peut alors être envisagé une quelconque autonomie (même partielle) du système primaire (pour une représentation de données « non-métaphorisables »). D'autre part, le transfert métaphorique entraîne inévitablement certains écarts ou plutôt certaines incohérences de relation : toutes les correspondances (par référence ou analogie) d'un même couple de systèmes ne pouvant renvoyer à un même champ de « valeurs » et de significations. Une troisième limitation (et non des moindres) concerne la complexification de traitement (compréhension-lecture) du système primaire en raison d'un couplage systémique bien souvent « hasardeux » (dans tous les cas perfectible). Une autre limitation mise clairement en évidence par l'approche « expérientialiste » [CS95], se réfère à la détermination des interprétations subjectives dans le processus de compréhension et de lecture de la métaphore. Cette dernière est (pour ainsi dire) « formée » au travers de l'expérience de chacun. Dès lors, des distorsions ou décalages peuvent apparaître entre les représentations mentales des concepteurs et celles des utilisateurs. Pour [Poy02], de tels écarts et dissociations en-

---

16. Au-delà de la fonction esthétique qui lui est généralement attribuée, la métaphore est avant tout un schème perceptivo-cognitif. Aussi, il convient donc de distinguer (en « métaphorologie ») les propriétés sémiotiques et esthétiques de la représentation métaphorique des dispositions perceptives et cognitives de la « métaphore cognitive ».

courent nécessairement une complication (et non une simplification de compréhension-lecture) du système primaire.

### **3.2. “*Datadesign = DataVis + DataFlow*”**

#### **3.2.1. *Représentation Orientée Objet (ROO)***

Rompant avec le paradigme métaphorique et travaillant au niveau des métadonnées (et non des données elles-mêmes), de nouvelles démarches de représentation en design (“datadesign” ou design d’information) inaugurent de nouvelles possibilités de représentation visuo-graphique des données complexes. Ces récentes approches innovent principalement par leur capacité à solutionner de nouveaux problèmes de représentation dynamique des données complexes ; en effet, on note que les différents schèmes et processus de représentation existants permettent de décrire dans un langage formel des informations relatives à un domaine de modélisation et de raisonner sur ces informations. Les schèmes et processus dynamiques supposent donc dorénavant que l’on s’attache à analyser les différents contenus sémantiques qui accompagnent la mise en œuvre des nouveaux ensembles informatiques de traitement (sémantique cognitive et sémantique interprétative). Aussi, il convient pour le designer de concevoir non plus seulement une semiosis (même originale) mais ce qu’il conviendrait d’appeler une physis (dépassant le paradigme « idiomatique » décrit par [Coo95], lequel remplaçait déjà le paradigme « mimétique [*mimésis*] ») répondant aux multiples contraintes d’évolution par la mutation et la génération de formes nouvelles. Rencontrant notamment les travaux de [Sow00] sur la sémantique de représentation des connaissances, il revient ici pour le designer d’envisager un système de signes capable d’évoluer selon une combinatoire (possiblement réglée d’avance). Par cette combinatoire, il s’agit de définir une représentation visuelle par (orientée) « objet » (vers une approche algébrique : sémantique des circularités, compromis expressivité-complexité). Chaque donnée, chaque ressource informationnelle, prise alors comme objet, évolue selon des variables d’instances et des classes définissant une authentique programmation visuelle (alliant représentation et présentation des données). Le designer se voit ainsi chargé de formuler cette programmation (cette dynamique

d'environnement en quelque sorte) distinguant, pour ce faire, plusieurs formats de données (composant autant de degrés de mutation, de transformation et d'évolution des données). Par là, il délimite un prisme de compréhension-lecture des informations du système dans leur pleine et entière complexité (s'appuyant pour cela sur la capacité de traitement prioritairement perceptive de l'utilisateur) : d'une vue logique cartésienne sur les informations du système (principalement déductive) à la vue systémique [Ros75] en quête d'une finalité, d'une résultante à tout phénomène, nous passons ici à une vue complexe présentant chaque donnée ou information comme une entité prise au cœur d'un ensemble en constante évolution. Une telle vue suppose au préalable une représentation du système dans son ensemble, mettant nécessairement en relation et en interaction d'autres systèmes participant à un processus opérationnel commun. Partant de là, celle-ci convoque une vision du système dans son ensemble selon la perspective d'un centre d'intérêt en relation.

Cela donne lieu à diverses propositions de représentation graphique dynamique visant une manipulation d'un nombre toujours plus grand d'items. Favorisant ainsi la découverte (fouille visuelle de données), la prise de décision et l'analyse (synthèse visuelle), celles-ci déploient différentes tactiques de sollicitation perceptive. La performance de ces représentations repose non seulement sur la perception (à la base du traitement visuel) mais également sur les capacités cognitives (dynamiques) et mémorielles de l'utilisateur. De plus, outre l'attention portée par l'utilisateur aux événements visuels qui se présentent à lui, il convient également ici de tirer avantage d'une perception « pré-attentive » repérant et décryptant (de manière presque intuitive) des caractéristiques de base comme par exemple l'orientation de ligne, la longueur, l'épaisseur, la taille, la courbure, la cardinalité, les terminaisons, les intersections, l'inclusion, la teinte, le clignotement, la direction de mouvement, la profondeur stéréoscopique, l'indice 3D, la direction de l'éclairage, etc.

Cette démarche de design entend situer sa contribution au niveau de la formalisation « interfacique » (et non seulement de sa conception), et ce du point de vue de l'évolution de la tradition structurale dont relèvent les différentes échelles d'iconicité vers la prise en compte des processus qui mènent de la perception à ses représentations ; elle traite alors,

plus particulièrement, de la relation entre les propriétés phénoménales ou encore qualitatives de l'expérience perceptive et de ses propriétés intentionnelles dans le jugement esthétique. L'interfaçage devient ici l'espace de résolution de l'expression et de la représentation-visualisation de la complexité informationnelle – car s'il est entendu que de l'interface dépend la qualité et la précision des systèmes de représentation de l'information, il conviendra plus largement d'admettre que de son modèle formel découlent la formation du sens, puis l'articulation des significations. Les formes et symboles graphiques, les couleurs, les déplacements et enchaînements jusqu'aux « interacteurs » de manipulation des données, tous ces éléments sont autant de paramètres d'influence dans une logique de retranscription d'une réalité informationnelle ou bien encore de visualisation d'une abstraction. Citons certains acteurs de renom tels que Aaron Koblin [Kob], Peter Cho [Cho], Benjamin Fry [Fry] ou bien encore Marcos Weskamp [Wes], Moritz Stefaner [Ste], Valdis Krebs [Kre], W. Bradford Paley [Pal], Martin Wattenberg [Wat], Santiago Ortiz [dlB] etc.

Nous verrons au chapitre suivant comment une telle démarche de design (en faveur d'une programmation de formalisation d'interface) s'intègre à la mise en œuvre d'une approche par « points de vue étendus ».

#### **4. Une approche par « points de vue étendus »**

##### **4.1. *La notion de « point de vue »***

Comme nous l'avons vu précédemment, face à la complexification des SI et de leurs modélisations, les modèles deviennent trop complexes pour être simplifiés de manière appréhendable et compréhensible par l'homme [GAE05]. Dès lors, de nombreux travaux se sont intéressés à la notion de point de vue, que ce soit dans le cadre des méthodes de conception, de la représentation de la connaissance ou du génie logiciel<sup>17</sup>. Bien que cette notion de point de vue ne soit pas nouvelle [Min75], laquelle repose sur l'idée qu'un objet est perçu à partir d'un

---

17. Pour un état de l'art des différentes approches de la notion de point de vue dans le cadre de l'ingénierie des SI, le lecteur pourra se référer à [LRG09].

point de vue qui est celui de l'observateur, celle-ci (si elle est associée à une réflexion plus large portée sur la formalisation interfacique) peut aujourd'hui jouer un rôle central dans l'aide à la maîtrise et à l'utilisation du système [SG96]. Notons, qu'une technique de création de points de vue ne doit pas seulement permettre un changement de granularité mais également un déplacement d'univers sémantique. Les approches récentes explicitent les points de vue possibles lors des phases de définition, de conception d'un SI. Pour exemple, [NGC<sup>+</sup>05] définit un profil UML permettant l'élaboration de composants multivues. Premièrement, s'il est tout à fait pertinent de définir des points de vue durant les phases de la conception d'un système, cela reste finalement assez limitatif. En effet, les possibilités sont celles prédéfinies en amont, pour un ensemble de profils déterminés à l'avance, et ne peuvent tenir compte de l'évolution des usages. Or, nous assistons de plus en plus à une formalisation dynamique de processus métier. Deuxièmement, peu de travaux cherchent à projeter une "vue" tenant compte des nouvelles approches de développement de systèmes donnant priorité au besoin de traitement des données.

## **4.2. Des « points de vue étendus »**

### *4.2.1. Du « point de vue » à la vue utilisateur*

C'est précisément autour du problème ayant trait à la difficulté d'une représentation multiple que nous avons choisi d'orienter notre proposition. L'objectif étant d'offrir l'accès le plus large mais également le plus simple et le plus rapide possible pour l'utilisateur.

Nous voulons définir des opérateurs génériques qui permettent une restructuration de la visualisation du système, de la perception qu'en a l'utilisateur, en fonction de son besoin ; cela suppose de concevoir la vision utilisateur dès la phase de conception, c'est-à-dire très en amont. Ces fonctionnalités doivent alors s'inscrire comme un service, se rajoutant aux approches de modélisation existantes. Ainsi nous pourrions créer, non plus des représentations préétablies par un profil d'emploi mais des cellules d'activités correspondant aux diverses phases de développement de projet, permettant de préparer une nouvelle démarche d'ingénierie. De là, il devient alors possible de construire des profils

utilisateur, que nous qualifierons d'*étendus*, tenant compte de différents paramètres tels que l'activité de l'utilisateur ainsi que sa localisation, sa situation ou bien encore son équipement. Selon qu'un utilisateur recoure à l'usage d'une tablette tactile, d'un ordinateur portable ou résident, qu'il opère en mobilité ou non, en mode coopératif/collaboratif ou non, l'interface variera en conséquence offrant un meilleur agrément d'usage et, conséquemment, une plus grande performance (croisant efficacité et efficience) de traitement ainsi que de production de l'information – la notion de *point de vue étendu* n'est alors pas ici à comprendre comme une focalisation (macro/micro) ou un (re)cadreage du champ de vision (large/resserré) mais bien comme un aménagement<sup>18</sup>, une adaptation (voire, le cas échéant, comme une correction) visuo-graphique du complexe (ou *prisme*) *sémantico-représentationnel* propre à la vue utilisateur en fonction des données du contexte.

Prenons, pour exemple, le cas d'un modèle de SI d'une compagnie aérienne représentant une flotte d'avions. Indépendamment des problèmes de confidentialité, il est certain que toutes les informations disponibles ne relèvent pas d'un même niveau d'exploitation/utilisation. Aussi, afin d'adresser ces informations aux destinataires visés, il conviendra donc de créer une vue utilisateur métier, puis d'adapter les points de vue en fonction des besoins de chaque utilisateur (ingénieur/technicien ou bien encore expert de maintenance avionique, etc.). Si nous nous intéressons plus particulièrement à la conduite des opérations de maintenance au sol, un mécanicien systèmes-avionique aura besoin d'une vue synthétique indiquant l'état de l'avion et de ses équipements, la liste (et séquence) des tâches à exécuter, le plan et les notices de maintenance etc. Quant à l'expert en maintenance, il requerra pour sa part une vue globale de la flotte à laquelle devra s'ajouter des informations de géolocalisation des différents avions ou bien encore des informations relatives aux pièces de rechange disponibles en vue de prévoir les plans d'acheminements en cas de pannes, etc. Dans le premier cas, le mécanicien, en situation de mobilité (se trouvant entre l'avion et le centre sol de la compagnie aérienne), dispose d'un temps d'intervention limité. Ainsi, à la vue métier doit s'associer ici un point de

---

18. Ces points de vue étendus peuvent permettre de suivre, par exemple, les diverses phases de développement de projet.

vue étendu, adapté par exemple aux propriétés d’affichage et modalités d’interaction de son terminal portable, aux besoins d’informations requises (informations contextuelles), etc. Pour l’expert, le point de vue étendu présentera une plus grande quantité d’informations géolocalisées (réseaux de données spatiales) exploitant les grandes capacités d’affichage de son éventuel terminal résident (équipé d’un bi-écran). Dans ce contexte, l’avion est considéré comme un nœud du SI de la compagnie et s’appuie également sur une chaîne de communication sol/bord interopérable et évolutive.

Pour ce faire, il faut définir les transformations permettant de passer du modèle du SI et de ses données à la représentation et la visualisation la plus adaptée au besoin de l’utilisateur. Il convient donc, de définir de véritables programmations visuelles [NCIS02] [Chi00] [VWvH<sup>+</sup>07], relatives à un encodage graphique, réécrivant les données sous forme d’objets graphiques, c’est-à-dire associant à chaque variable issue des données une variable graphique (une position, une longueur, une aire, une couleur, une luminosité, une saturation, une forme, une texture, un angle, une courbure, etc.).

D’autre part, par la construction d’alternatives de représentation, mais également d’interaction avec les données, il s’élaborera de nouvelles stratégies organisationnelles pour une meilleure gestion du tissu informationnel complexe des systèmes. Participant ici non plus seulement au travail de restitution graphique des informations extraites du système, cette visualisation mobilisera plus fortement la capacité de traitement humain, par le couplage de la vision et de l’action : d’une interaction directe aux objets, le point de vue évoluera et se construira de manière itérative.

Les avancées dans les technologies de transformation de modèles laissent entrevoir la possibilité de transformer les modèles formels représentant le SI, en une représentation graphique. Cela signifie qu’à partir de modèles définis dans des langages de modélisation “classiques”, conformes au standard *Meta-Object Facility* (MOF) [omg06], il est possible d’offrir une représentation contextuelle cohérente du système côté utilisateur. Il revient alors de définir des métalangages de ces représentations ainsi que des transformations associées disposant à la fois d’un haut degré d’expressivité, d’utilisabilité et d’opérabilité.

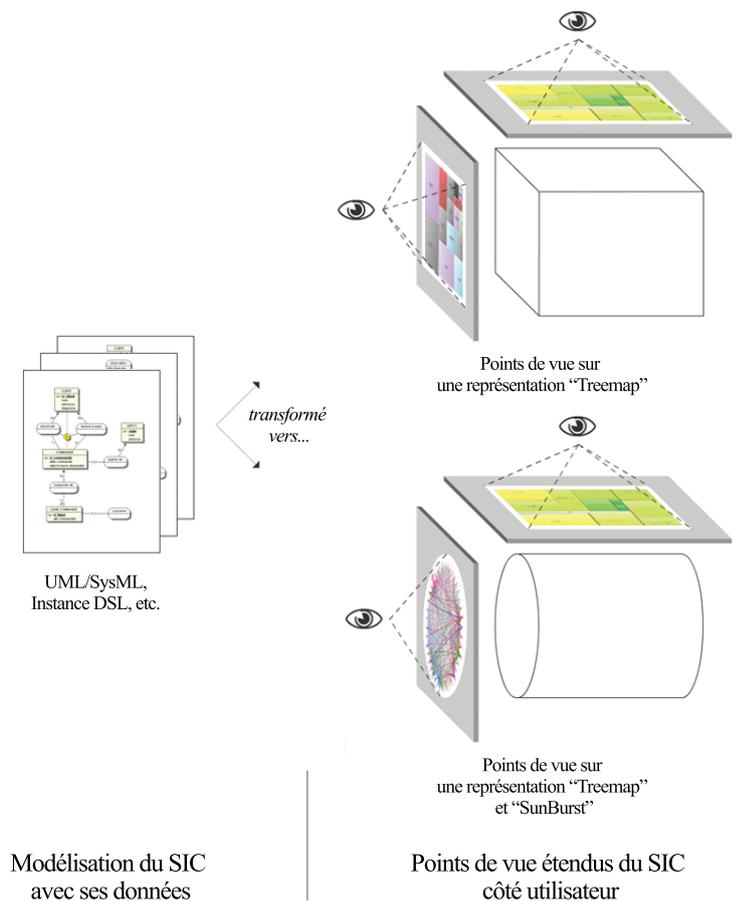


Figure 2 – Transformation du modèle du SIC et de ses données vers des « points de vue étendus »

Ainsi, de représentations prédéfinies, il convient de passer à des représentations dynamiques d'informations offrant de générer dynamiquement différents points de vue adaptés et sensibles aux différents contextes et situations d'emploi/usage rencontrés. Dès lors, pour parvenir à gérer et à maîtriser la complexité des SI, il convient (nous en faisons ici l'hypothèse) de canaliser et de centraliser les processus autour d'une seule et même « interface ».

### 4.3. VSML : “*a Visual Semantic unified Modeling Language*”

#### 4.3.1. *Du modèle vers sa représentation-visualisation*

La construction d'un SIC passe nécessairement par la définition de « sous-modèles » ou « modèles partiels » renvoyant à une subdivision, à une fragmentation parcellaire du système en fonction des besoins des différents acteurs. Dès lors, si une telle “segmentation” engendre certains risques de cohérence, celle-ci soulève également certains problèmes de cohésion des différents points de vue sur le système. C'est dans une volonté de réduction des écarts de cohérence et de cohésion des sous-modèles et points de vue que [NGC<sup>+</sup>05] mettent au point une méthode reliant « objet » et « point de vue » autour d'un modèle unifié avec points de vue multiples. Leur langage, *View based Unified Modeling Language*' (VUML), ajoute une classe « multivues » à UML permettant de stocker et restituer l'information en fonction du profil de l'utilisateur. Cette dernière offre alors des mécanismes de gestion des droits d'accès aux informations et de gestion de la cohérence entre les vues dépendantes.

L'approche (en cours d'élaboration) que nous présentons ici se voit en quelque sorte héritée, du moins conceptuellement, de VUML par le fait d'opérer à un rapprochement du « modèle » et du « point de vue ». Toutefois, elle s'en distingue par la construction de représentations-visualisations de modèles basées sur la génération de points vue étendus. En effet, nous proposons de définir les transformations de modèles permettant de passer d'un modèle du SIC à un modèle de sa représentation visuelle (voir Figure 3). Ce modèle de « représentation étendue » repose sur un langage visuo-graphique adapté (sémantiquement cohérent et conforme au profil d'emploi/d'usage recherché) baptisé *a Visual Semantic unified Modeling Language* (VSML). Etant donné un modèle source dans un langage de modélisation, il nous faut élaborer une mise en correspondance des concepts sémantiques du modèle vers ceux de VSML au travers de règles de sémantique graphique et visuelle. L'édition de ces règles fait suite à une étude préalable (toujours en cours) relevant de l'évaluation structuro-sémantique des modèles de représentation-visualisation d'informations complexes existants, ceci afin d'isoler certaines règles et logiques d'organisation des données

et relations des données entre elles. Cet examen, relevant d'une analyse typologique des modèles de représentation-visualisation de données (méthode de définition par « recoupement » des particularités et invariances), nous permet d'isoler la sémantique propre à chaque technique de représentation-visualisation pour en adapter ainsi son « utilisation ».

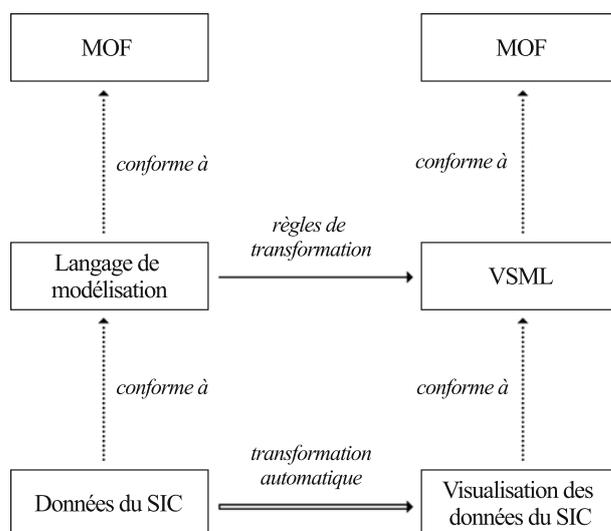


Figure 3 – Illustration du principe de transformation du langage de modélisation vers le langage de représentation visuelle (VSML)

Pour construire un modèle de « représentation étendue » d'un ensemble de données, il convient donc préalablement de disposer d'un premier modèle qui en décrit sa structure. Après quoi, nous proposons d'identifier au sein de ce modèle les entités qui concernent ou intéressent l'utilisateur au moyen d'« étiquettes sémantiques »<sup>19</sup>. Ces dernières permettront alors d'édicter des règles génériques en vue d'explicitier la transformation du modèle vers un nouveau modèle exprimé dans notre langage VSML ; ces règles génériques tiendront compte de deux facteurs que sont, d'une part, l'organisation des données et, d'autre part, les moyens et modalités de visualisation à disposition de l'utilisateur<sup>20</sup>. Prenons l'exemple schématique d'un utilisateur souhaitant obtenir des

19. Cf. tags/marqueurs sémantiques venant qualifier les différentes entités.

20. En référence aux propriétés, caractéristiques d'affichage du terminal cible.

données au sein desquelles figurent des relations telles que des compositions et/ou des agrégations et que ce même utilisateur dispose d'un équipement informatique comprenant un écran "haute résolution", la transformation vers VSML se fera alors vers une représentation de type "Treemap" (cartographie hiérarchique 2D exploitant la totalité de la surface d'affichage "écran"); les agrégations et compositions se verront alors traduites au travers de l'encapsulation de "blocs" (relation d'héritage) empruntant un certain code chromatique (relation de similarité). En revanche, si cet utilisateur ne dispose que d'un terminal mobile (renvoyant à un espace d'affichage "écran" relativement restreint) et qu'il souhaite focaliser son attention sur les liens entre les différentes entités, alors les règles proposées réaliseront une transformation vers une représentation de type "Sunburst" (toujours exprimée en VSML). Ainsi, une fois les transformations de modèle à modèle établies (et ce, grâce aux avancées de l'IdM), l'opération qui consiste à transformer les données nécessaires à l'utilisateur (relatives au modèle de départ) vers le modèle de représentation visuelle en VSML se réalise automatiquement.

#### 4.3.2. Vers une « vision sémantique »

Il est à noter qu'une telle « extraction sémantique » des techniques de représentation-visualisation n'a d'intérêt que parce que notre approche intègre une Représentation (visuelle) Orientée Objet (ROO), laquelle s'associe à une démarche de recherche en design – vers une formalisation « interfacique » dynamique des données par représentation (visuelle) orientée « objet » : en direction d'une approche algorithmique, combinatoire et asymptotique – laquelle prévoit une généralité possible de l'ensemble des éléments de langage visuo-graphiques de représentation-visualisation de données :

- **Le champ** large ou resserré, fixant le cadre visuel (et sémantique) sur les données/informations,

- **Le signe** comprenant les icônes, les index, les symboles composant le système de représentation (mais également de description et d'orientation) visuelle,

- **La focalisation** macro ou micro, suivant les possibilités offertes à l'utilisateur de réduire ou encore d'agrandir le cadre de l'écran (ex : zoom sémantique), etc.

De là, nous définissons alors le concept de « vision sémantique » (en direction d'une vision du système alors sémantiquement cohérente), corolaire du concept de « géosémantique » développé par [Bih07], lequel entend permettre de prédéfinir (en phase de modélisation ou de conception de système) les règles de correspondance sémantique des données entre elles au travers du typage des liens, relations croisées entre objets/entités/données, en vue d'aboutir à une meilleure adaptation de leurs modèles de représentation-visualisation à l'écran.

Notre approche, fondée sur l'analyse sémantique de représentation-visualisation de modèles, engage nécessairement une démarche de recherche croisée de « design et ingénierie des modèles ». Nous considérons qu'il peut naître d'une telle union, de nouvelles méthodes et pratiques de conception et donc de traitement des SIC, lesquelles apporteraient une réelle « plus value » en matière d'écologie de la perception visuelle dans le cadre d'environnements de données variés, contraints, multi-changeants et aujourd'hui ultra-fragmentés (composites), saturés et de plus en plus complexes. C'est pourquoi, cette approche, encore en cours de définition, vise une nouvelle « sémantisation » ou extension sémantique des langages de modélisation en proposant d'ajouter des informations sémantiques aux modèles pour une génération de modèles de représentation étendue adaptant dynamiquement différentes vues via différents points de vue étendus et offrant aux utilisateurs du système un cadre de travail et de consultation visuo-graphique doué d'une plus grande richesse fonctionnelle et opératoire.

## 5. Conclusion

Parce qu'il convient de trouver réponse aux problèmes majeurs soulevés en section 2 relevant de la multiplicité de processus, de l'augmentation croissante de l'hétérogénéité des SIC et de la surabondance des informations et données administrées, notre approche entend instaurer une nouvelle dynamique de l'information, tirant partie de l'expertise acquise en matière d'interfaçage graphique, en vue de renouveler l'apport de solutions de représentation-visualisation pour une meilleure maîtrise des systèmes. Autrement dit, ce qui importe ici, c'est précisément d'engager une représentation cohérente du système offrant une grande

« contextualisation » et par là une large visualisation des échanges entre les données. Dès lors, pour que le SI parvienne à gérer, à maîtriser la complexité inhérente à l'entreprise, nous pensons qu'il convient de canaliser, de centraliser, les « flux » (processus et informations) autour d'une seule et même « interface » assurant la mise en correspondance des divers services (ex : ingénierie, méthode, achat, fabrication, logistique et contrôle qualité dans un contexte d'entreprise étendue).

Ainsi, d'une sémantique des données, nous proposons par notre approche de passer à une « schématique » [Tuf01] offrant de produire et de générer des représentations multiples (« points de vue étendus ») du système de l'entreprise selon les différents contextes et situations rencontrés. Il s'engage alors une gérance dynamique croisée des flux de données et des données elles-mêmes débouchant sur un autre paradigme de représentation visuelle dynamique de l'information : en faveur de la conception de nouvelles grammaires et organisations visuelles réadaptant les lois de la gestalt (proximité, similarité, continuité mais également perception du mouvement, etc.) et revisitant par là même la sémiologie graphique de [Ber67]. De là, il naît de nouveaux complexes de formes, véritables géographies d'informations agiles, s'attachant dès lors à définir un système de représentation des données de l'entreprise au travers de leur propre dynamique.

Dès lors, nous emportons la conviction qu'une telle approche trouvera à s'inscrire dans la mouvance de nombreux travaux qui, depuis plus d'une trentaine d'années, ont renouvelé la réflexion sur la problématique de l'approche systémique de l'information au travers de la création et de la planification de solutions de traitement.

## Références

- [Ber67] Jacques Bertin. *Sémiologie graphique*. Mouton Paris Gauthier-Villars, Z ; Paris, La Haye, 1967.
- [Bih07] D. Bihanic. *Espace, lieux et hypercartes, étude sur la spatialité des réseaux et la géographie d'information*. PhD thesis, Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne, 2007.

- [BMMS91] A. Buja, J. A. McDonald, J. Michalak, and W. Stuetzle. Interactive data visualization using focusing and linking. In *Vis'91*, pages 156–163. IEEE Computer Society Press, 1991.
- [CCKT83] John M. Chambers, William S. Cleveland, Beat Kleiner, and Paul A. Tukey. *Graphical Methods for Data Analysis*. Wadsworth, 1983.
- [CDRH99] M. P. Czerwinski, M. Van Dantzich, G. Robertson, and H. Hoffman. The contribution of thumbnail image, mouse-over text and spatial location memory to web page retrieval in 3d. In *Proceedings of Interact'99*, pages 163–170. Springer, 1999.
- [Chi00] Ed H. Chi. A taxonomy of visualization techniques using the data state reference model, 2000.
- [Cho] Peter Cho. <http://www.pcho.net/>. [Online ; accessed 7-October-2011].
- [Cle85] William S. Cleveland. *The Elements of Graphing Data*. Hobart Press, 1985.
- [Cle93] William S. Cleveland. *Visualizing Data*. Hobart Press, 1993.
- [CM88] William S. Cleveland and Marylyn E. McGill, editors. *Dynamic Graphics for Statistics*. Wadsworth, 1988.
- [CMS99] S. K. Card, J. D. Mackinlay, and B. Shneiderman. *Readings in Information Visualization : Using Vision to Think*. Morgan Kaufmann Publishers Inc., London, 1999.
- [Col04] A.-S. Collard. Quels enjeux éducatifs pour quelles métaphores ? In *Technologies de l'information et de la connaissance dans l'enseignement supérieur et l'industrie*, TICE2004, 2004.
- [Coo95] A. Cooper. The Myth of Metaphor. *About Face : The Essentials of User Interface Design*, 1 :53–66, 1995.

- [CS95] R. D. Coyne and A. B. Snodgrass. Problem setting within prevalent metaphors of design. *Design Issues*, 11(2) :31–61, 1995.
- [CTM<sup>+</sup>06] F. D. Ciccarelli, T. Doerks, C. Von Mering, C. J. Creevey, B. Snel, and P. Bork. Toward automatic reconstruction of a highly resolved tree of life. *Science*, 311(5765) :1283, 2006.
- [dlB] Site Internet de l’agence Bestiario. <http://www.bestiario.org/>. [Online ; accessed 7-October-2011].
- [Eng68] D. C. Engelbart. A research center for augmenting human intellect. In *(90-min. video recording) live online hypermedia demonstration/presentation at the Fall Joint Computer Conference, UIST ’98*, December 1968.
- [Fra02] David Frankel. *Model Driven Architecture : Applying MDA to Enterprise Computing*. John Wiley & Sons, Inc., New York, NY, USA, 2002.
- [Fry] Benjamin Fry. <http://benfry.com/>. [Online ; accessed 7-October-2011].
- [GAE05] C. Gershenson, D. Aerts, and B. Edmonds. *Worldviews, science and us : philosophy and complexity*. World Scientific, Washington (EU), 2005.
- [Gro03] Object M. Group. Technical Guide to Model Driven Architecture : The MDA Guide v1.0.1. Technical report, Object Management Group (OMG), June 2003.
- [Kob] Aaron Koblin. <http://www.aaronkoblin.com/>. [Online ; accessed 7-October-2011].
- [Kre] Valdis Krebs. <http://www.orgnet.com/>. [Online ; accessed 7-October-2011].
- [KY93] H. Koike and H. Yoshihara. Fractal approaches for visualizing huge hierarchies. In *IEEE Symposium on Visual Languages*, pages 55–60, 1993.

- [Lel96] R. Lellouche. Une théorie de l'écran. *Revue Traverses*, 2, 1996.
- [LJ80] G. Lakoff and M. Johnson. *Metaphors we Live by*. University of Chicago Press, Chicago, 1980.
- [LRG09] B. Lahna, O. Roudiès, and J.-P. Giraudin. Approches par points de vue pour l'ingénierie des systèmes d'information. *e-TI - la revue électronique des technologies d'information*, 5, 2009.
- [LRP95] J. Lamping, R. Rao, and P. Pirolli. A focus+context technique based on hyperbolic geometry for visualizing large hierarchies. In *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems, CHI '95*, pages 401–408, New York, NY, USA, 1995. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co.
- [MHCF96] T. Munzner, E. Hoffman, K. Claffy, and B. Fenner. Visualizing the global topology of the mbone. In *Proceedings of the 1996 IEEE Symposium on Information Visualization, INFOVIS '96*, pages 85–92, Washington, DC, USA, 1996. IEEE Computer Society.
- [Min75] M. Minsky. A framework for representing knowledge. In P. Winston, editor, *The Psychology of Computer Vision*. McGraw-Hill, New York, 1975.
- [NCIS02] Chris North, Nathan Conklin, Kiran Indukuri, and Varun Saini. Visualization schemas and a web-based architecture for custom multiple-view visualization of multiple-table databases. In *Information Visualization, Palgrave-Macmillan*, pages 211–228, 2002.
- [NFG<sup>+</sup>06] L. Northrop, P. Feiler, R. P. Gabriel, J. Goode-nough, R. Linger, T. Longstaff, R. Kazman, M. Klein, D. Schmidt, K. Sullivan, and K. Wallnau. Ultra-large-scale systems - the software challenge of the future. Technical report, Software Engineering Institute, Carnegie Mellon, June 2006.

- [NGC<sup>+</sup>05] M. Nassar, J. Guiochet, B. Coulette, X. Crégut, and S. Ebersold. Vers un profil uml pour la conception de composants multivues. *L'Objet*, 11(4) :83–113, décembre 2005.
- [omg06] omg. *Meta Object Facility (MOF) Core Specification Version 2.0*, 2006.
- [Pal] W. Bradford Paley. <http://wbpaley.com/brad/>. [Online ; accessed 7-October-2011].
- [Poy02] F. Poyet. La métaphore spatiale pour la navigation en situation de formation en ligne. *Choplin, H. (dir.) Les TIC au service des nouveaux dispositifs de formation*, Education Permanente(152) :19–29, 2002.
- [RCL<sup>+</sup>98] G. Robertson, M. Czerwinski, K. Larson, D. C. Robbins, D. Thiel, and M. van Dantzich. Data mountain : using spatial memory for document management. In *Proceedings of the 11th annual ACM symposium on User interface software and technology*, UIST '98, pages 153–162, New York, NY, USA, 1998. ACM.
- [RMC91] G. Robertson, J. D. Mackinlay, and S. K. Card. Cone trees : animated 3d visualizations of hierarchical information. In *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems : Reaching through technology*, CHI '91, pages 189–194, New York, NY, USA, 1991. ACM.
- [Ros75] J. Rosnay. *Le microscope : vers une vision globale*. Points. Série Essais. Éditions du Seuil, 1975.
- [SG96] M. Shaw and D. Garlan. *Software architecture : perspectives on an emerging discipline*. Prentice-Hall, Inc., Upper Saddle River, NJ, USA, 1996.
- [Shn92] B. Shneiderman. Tree visualization with tree-maps : 2-d space-filling approach. *ACM Trans. Graph.*, 11 :92–99, January 1992.

- [Sin93] C. Sinding. Les métaphores en biologie : analogies ou outils de pensée? *Intellectica, Biologie et Cognition*, 1(16) :85–89, 1993.
- [Sow00] J. F. Sowa. *Knowledge representation : logical, philosophical and computational foundations*. Brooks/Cole Publishing Co., Pacific Grove, CA, USA, 2000.
- [Ste] Moritz Stefaner. <http://well-formed.eigenfactor.org/>. [Online ; accessed 7-October-2011].
- [STT81] Kozo Sugiyama, Shojiro Tagawa, and Mitsuhiko Toda. Methods for visual understanding of hierarchical system structures. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, SMC-11(2) :109–125, February 1981.
- [Tuf83] E. R. Tufte. *The Visual Display of Quantitative Information*. Graphics Press, Cheshire, Connecticut, 1983.
- [Tuf90] E. R. Tufte. *Envisioning Data*. Graphics Press, Cheshire, Connecticut, 1990.
- [Tuf97] E. R. Tufte. *Visual Explanations*. Graphics Press, Cheshire, Connecticut, 1997.
- [Tuf01] E.R. Tufte. *The Visual Display of Quantitative Information*. Graphics Press, Cheshire, CT, 2. edition, 2001.
- [Tuk77] J. W. Tukey. *Exploratory Data Analysis*. Addison Wesley, 1977.
- [VWvH<sup>+</sup>07] Fernanda B. Viegas, Martin Wattenberg, Frank van Ham, Jesse Kriss, and Matt McKeon. Manyeyes : a site for visualization at internet scale. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 13 :1121–1128, 2007.
- [Wat] Martin Wattenberg. <http://www.bewitched.com/>. [Online ; accessed 7-October-2011].
- [Wes] Marcos Weskamp. <http://marumushi.com/>. [Online ; accessed 7-October-2011].

- [Woo84] David D. Woods. Visual momentum : a concept to improve the cognitive coupling of person and computer. *International Journal of Man-Machine Studies*, 21 :229–244, 1984.