HAL open science

Modélisation graphique des SI. Du traitement visuel de modèles complexes

David Bihanic, Max Chevalier, Sophie Dupuy-Chessa, Xavier Le Pallec, Thierry Morineau, Thomas Polacsek

To cite this version:

David Bihanic, Max Chevalier, Sophie Dupuy-Chessa, Xavier Le Pallec, Thierry Morineau, et al.. Modélisation graphique des SI. Du traitement visuel de modèles complexes. Journées INFormatique des Organisations et Systemes d'Information et de Decision (INFORSID 2013), May 2013, Paris, France. pp.99-114. hal-03668941

HAL Id: hal-03668941

https://hal.science/hal-03668941

Submitted on 16 May 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Open Archive TOULOUSE Archive Ouverte (OATAO)
OATAO is an open access repository that collects the work of Toulouse researchers and makes it freely available over the web where possible.

This is an author-deposited version published in : http://oatao.univ-toulouse.fr/
Eprints ID : 13064

To cite this version : Bihanic, David and Chevalier, Max and Dupuy-Chessa, Sophie and Le Pallec, Xavier and Morineau, Thierry and Polacsek, Thomas *Modélisation graphique des SI. Du traitement visuel de modèles complexes*. (2013) In: INFormatique des Organisations et Systemes d'Information et de Decision (INFORSID), 29 May 2013 - 31 May 2013 (Paris, France).

Any correspondance concerning this service should be sent to the repository administrator: staff-oatao@listes-diff.inp-toulouse.fr

Modélisation graphique des SI

Du traitement visuel de modèles complexes

David Bihanic[*] — Max Chevalier[+] — Sophie Dupuy-Chessa[×] — Xavier Le Pallec[○] — Thierry Morineau[□] — Thomas Polacsek[◇]

[*] *CALHISTE, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, Mont-Houy, 59313 Valenciennes Cedex 9*
david.bihanic@univ-valenciennes.fr

[+] *IRIT, Université Paul Sabatier, 118 route de Narbonne, 31062 Toulouse Cedex 9*
max.chevalier@irit.fr

[×] *LIG, Université Pierre Mendès France, B.P. 53, 38041 Grenoble Cedex 9*
Sophie.dupuy-chessa@imag.fr

[○] *LIFL, Université Lille 1, Cité Scientifique, 59655 Villeneuve d'Ascq Cedex*
xavier.le-pallec@univ-lille1.fr

[□] *CRPCC, Université de Bretagne-Sud, Campus de Tohannic, Centre Yves Coppens, 56000 Vannes*
thierry.morineau@univ-ubs.fr

[◇] *Département Traitement de l'information et Modélisation, ONERA Toulouse, 2 avenue Edouard Belin, 31055 Toulouse*
thomas.polacsek@onera.fr

RÉSUMÉ. *Aux problématiques de gestion de la complexité des systèmes succèdent aujourd'hui celles relevant de la maîtrise de la complexité croissante des modèles de systèmes. Nonobstant diverses avancées significatives récentes pour la conception et la manipulation de modèles, force est de constater que les solutions actuelles demeurent inopérantes dans le cas de modèles devenus complexes, à la fois hétérogènes et à dimension métier. Après un premier état des lieux signalant les diverses particularités et propriétés de ces modèles complexes, nous tacherons de montrer au sein du présent article que de nouveaux apports peuvent émerger du croisement interdisciplinaire entre l'Ingénierie dirigée par les Modèles, l'Ingénierie de la conception de systèmes, l'Ergonomie Cognitive et le Design d'interface.*

ABSTRACT. *The problem of the management of the systems' complexity is followed today by the problem of the increasing complexity of models. Despite recent significant advances in the design of models, it is clear that current solutions remain inoperative in the case of complex models, both heterogeneous and with multi business dimensions. After a state of the art of the various properties of complex systems and the links with dense models, we show, in this article, how new contributions can emerge from an interdisciplinary dialog between Model-driven engineering, Systems Design, Cognitive Ergonomics and Interface Design.*

MOTS-CLÉS : *modèles complexes, modélisation graphique, IdM, conception de SI, design d'interface, ergonomie cognitive.*

KEYWORDS: *complex/big models/models for large-scale, graphical modeling, MdI, IS design, Interface design, cognitive ergonomics.*

1. Introduction

La plupart des organisations adoptent aujourd'hui une démarche stratégique visant une rationalisation et optimisation de l'ensemble de leurs processus métier[1] pour une intégration globale de leurs activités au sein du Système d'Information (SI). Par-là, elles entendent prioritairement gagner en souplesse dans l'alignement du SI sur leur stratégie ; le SI devenant alors un élément essentiel et structurant de l'organisation. Si une telle démarche s'avère résolument vertueuse, elle n'est pas sans soulever d'importants problèmes à résoudre. En effet, le SI souvent composé par strates successives atteint rapidement une taille critique doublée d'une forte hétérogénéité dès lors problématiques. Afin de pallier un tel écueil, il importe donc de définir une représentation complète des systèmes laquelle renvoie à la construction d'une abstraction reliant le SI aux autres systèmes environnants. L'organisation y est représentée comme une entité dynamique dans toutes ses dimensions : commerciales, financières, technologiques, temporelles voire même « trans-organisationnelles ».

Toute conception de SI passe en premier lieu par une modélisation, c'est-à-dire par une cartographie des *éléments*, des *ensembles* et des *flux* permettant de saisir les relations qui régissent la systémique d'information propre à chaque organisation. Pour ce faire, il convient ordinairement de recourir à l'emploi de langages de modélisation tels qu'UML[2], SysML[3], BPMN[4] ou dans certains cas à la création de langages métiers dédiés[5]. Seulement, devant une telle inflation de la taille, de l'hétérogénéité et de l'évolutivité de certains modèles manifestement impossibles à appréhender par leurs utilisateurs, ces mêmes langages se révèlent souvent inopérants renvoyant notamment divers problèmes de formalisation et de représentation.

C'est précisément au carrefour de ces difficultés nouvelles que se situe notre réflexion collective laquelle visera à définir un nouveau cadre théorique, conceptuel et méthodologique pour la construction de modèles *appréhendables* (le diagramme). Obligeant à clarifier ce qu'est une bonne notation (syntaxe concrète), sans en passer par une révision des formalismes et concepts qui sous-tendent la modélisation (syntaxe abstraite), nous nous attacherons précisément à l'étude des modèles conceptuels et procéderons à un examen interdisciplinaire des fondements épistémologiques de l'écriture développée dans le monde de l'ingénierie des SI et plus largement du Génie Logiciel (GL). Pour ce faire, nous tenterons, dans un premier temps (section 2), de dresser un état des lieux des principaux problèmes et difficultés rencontrés en modélisation et signalerons en quoi les notations des langages existants font obstacle à la bonne représentation de modèles que nous qualifierons de complexes. Nous tacherons, dans un second temps (section 3),

---

1. Pour une plus grande souplesse dans l'alignement du système d'information sur la stratégie de l'entreprise.
2. "Unified Modeling Language", trad. « langage de modélisation unifié ».
3. "Systems Modeling Language", trad. « langage de modélisation systèmes ».
4. "Business Process Model and Notation", trad. « modélisation et notation des processus métiers ».
5. De l'anglais "Domain Specific Language (DSL)".

d'identifier les éléments qu'il importe de prendre en compte en vue d'assurer une représentation efficiente de ces modèles, ou tout du moins acceptable et appréhendable perceptivement et cognitivement. Nous avancerons également certaines pistes de réflexion issues du croisement de travaux en Interaction Homme-Machine (IHM), en Ergonomie, Design et en Ingénierie, pour l'élaboration de représentations à la fois plus cohérentes et maniables du point de vue utilisateur.

2. De l'Ingénierie des Modèles (IdM) : état des lieux.

2.1. *Un accroissement de la complexité des modèles*

Comme nous le signalions en introduction, les organisations opèrent progressivement à une complète intégration de leurs activités au sein du SI. Cette informatisation globale encourt inévitablement une *démultiplication* des modèles tant au niveau des notations et paradigmes de modélisation[6] qu'au niveau conceptuel[7]. Si une telle démultiplication offre de contenir les informations de ces modèles jugés complexes[8], elle ne permet pas d'appréhender l'organisation dans sa totalité (Gershenson *et al.*, 2005). Une question émerge alors : sommes-nous face ici à un nouveau type de modèle dit *complexe* revêtant des propriétés analogues à celles repérées dans le cas d'un système complexe ? C'est fort probable. A noter qu'il n'existe pas *un* mais bien *des* systèmes complexes eu égard à la diversité des systèmes connus et référencés à ce jour. Il n'existe donc pas de définition unique, valable pour tous. Selon le Réseau National des Systèmes Complexes, un système complexe se voit « […] composé d'un grand nombre d'entités hétérogènes, dont les interactions locales créent de multiples niveaux de structures et d'organisations collectives »[9].

Concernant la taille des modèles de SI, il revient de constater que celle-ci croît de manière exponentielle chaque jour. Les problèmes relevant de la gestion des entrepôts de données s'imposent dorénavant aux organisations lesquelles doivent trouver à y faire face. Cette massification des données (Horgan, 1995), joignant celle des éléments du modèle structurant la donnée, occasionne d'insolubles difficultés du point de vue de la représentation des modèles, qu'il s'agisse des modèles de données comme des données elles-mêmes. Dès lors, une nouvelle question se fait jour : comment, au-delà d'un certain nombre d'entités, afficher, manipuler et rendre compte des différentes interactions entre les entités ?

Pour ce qui est de l'hétérogénéité des modèles, il revient de rappeler que le SI n'est pas un continent plat composé d'un seul type de données. Parce qu'il couvre

---

6. Cf. les différents diagrammes UML.
7. Cf. les cadres d'architectures tels que TOGAF, de l'anglais "The Open Group Architecture Framework".
8. Si la *complexité* des modèles rime ici avec une *complexification* jugée à certains égards problématique, nous ne manquerons pas plus avant de signaler que cette particularité reflète par ailleurs une qualité nouvelle et distinctive de certains modèles (des systèmes aux modèles complexes).
9. Trad. de l'anglais, URL: http://www.rnsc.fr (consulté le 30/01/2013).

des domaines différents, stockant des données de divers types, le SI se voit composé d'éléments hétérogènes. À ceci s'ajoute le fait que le SI n'est pas non plus un bloc monolithique mais bien plutôt l'agrégation de plusieurs systèmes entre eux. De cette hétérogénéité survient une difficulté nouvelle : celle de donner à voir la pluralité des éléments et des flux. Comme nous le verrons plus avant, les langages de modélisation ne sont pas véritablement efficaces, d'une part, pour rendre compte de cette pluralité d'éléments hétérogènes de manière graphique et visuelle et, d'autre part, pour associer à chaque entité une représentation claire et signifiante. Notons que lorsque viennent à se combiner les problèmes relatifs à l'hétérogénéité ainsi qu'à la taille, les modèles deviennent littéralement *insaisissables* lesquels ressemblent alors à un entrelacs de flèches et de symboles fort peu distincts entre eux, non affichables dans leur totalité sur un écran, et très difficilement manipulables.

À ces deux caractéristiques, taille et hétérogénéité, s'ajoute la *structuration multi-niveaux* à la fois verticale et horizontale. La première (*structuration verticale*) est à comprendre au sens d'une encapsulation ou d'une spécification. En effet, le SI peut être structuré par niveau d'abstraction. Pour exemple, la modélisation des activités d'une entreprise se voyant composée de représentations fonctionnelles, ces abstractions se raffineraient jusqu'à arriver à des modèles très concrets. Un tel découpage n'est bien évidemment pas *étanche* et même si chaque niveau peut avoir sa modélisation, il convient dans ce cas de ne pas négliger les interdépendances entre les niveaux – d'où la nécessité de représenter ces interactions sans interférer à leur bonne compréhension eu égard à une saturation d'informations. Parallèlement, le SI est aussi structuré horizontalement (*structuration horizontale*) : à un même objet peuvent être associés soit plusieurs modèles, soit un même modèle mais avec plusieurs vues ; chaque vue ayant ses propres données et son propre langage de description. Si nous nous intéressons aux descriptions se rapportant, par exemple, à un collaborateur salarié au sein d'une organisation, aux informations qui le représentent, à ses interactions avec les autres éléments du système ainsi qu'à la manière de le modéliser, nous noterons que celles-ci varient suivant l'angle qui sera choisi pour les considérer : production, comptable et/ou ressources humaines. Ainsi, à la pluralité des domaines et activités de l'organisation couverte par le SI s'associe *de facto* la pluralité des représentations, la diversité des vues et points de vue sur chaque domaine ; tout profilage étant résolument voué à l'échec. En d'autres mots, il serait tout à fait illusoire de déterminer par avance tout usage et profil d'emploi, de convenir de représentations prédéfinies, figées anticipant sur ce qui n'est manifestement pas prévisible.

Concernant le possible rapprochement sur lequel nous nous interrogions plus avant entre *systèmes complexes* et *modèles complexes* des SI, il nous faut rappeler ici une caractéristique majeure que renferme tout système complexe. Il s'agit de l'*émergence* (Ricard, 1995). Celle-ci renvoie à la formation et perception d'un comportement global du système en provenance de ses interactions locales. La qualité d'un tel comportement ne relève pas des éléments qui composent le système mais naît précisément des interactions qui s'exercent en son sein. S'il peut être intéressant de comprendre comment une propriété a émergé, reste que cela n'est en rien conforme à la spécification du SI. Aussi, dans le cas des modèles complexes,

nous considérons qu'il n'est pas pertinent de prendre en compte cette notion qu'est l'émergence. Nous définirons donc ces modèles comme des modèles hétérogènes, structurés suivant plusieurs dimensions métiers et possiblement de grande taille.

2.2. *En faveur d'une réforme des langages de modélisation*

Si nous nous accordons presque unanimement sur ce qu'est un modèle conceptuel, on ne peut que regretter qu'aucun consensus n'ait encore été trouvé pour déterminer ce qu'est un modèle conceptuel appréhendable. La norme ISO 9000 (Moody, 2005) en précise quant à elle les qualités générales : « l'ensemble des propriétés et caractéristiques d'un modèle conceptuel portent sur sa capacité à satisfaire des besoins à la fois explicites et implicites »[10]. Pour autant, rien n'indique distinctement ce qui fait les qualités propres d'un modèle lesquelles varieraient donc selon l'angle d'appréciation de chacun : du point de vue des outils, des concepteurs, etc. Dans le cas des modèles complexes, le problème majeur n'est autre que leur appréhension et manipulation par des opérateurs humains. En effet, si les machines sont en capacité de *gérer* techniquement la complexité des modèles, elles ne parviennent pas pour autant à en faciliter leur compréhension et leur manipulation pour l'utilisateur. C'est pourquoi nous nous intéressons principalement à ce qui a été défini par (Lindland *et al.*, 1994) comme la qualité pragmatique des modèles rapportée à leur interprétation. Ces travaux se concentrent ici principalement sur la définition de caractéristiques et métriques spécifiques. De son côté, (Moody *et al.*, 1994) proposent un ensemble de métriques qui tiennent compte des catégories d'acteurs manipulant les modèles : utilisateurs finaux, analystes, développeurs, etc. Si la définition de caractéristiques et de métriques est un élément primordial pour favoriser les bonnes pratiques de modélisation, un levier plus important pour améliorer la qualité pragmatique des modèles nous semble être la qualité induite par le langage de modélisation auquel se conforme le modèle[11]. C'est pourquoi, dans (Mandran, 2013), nous définissons une approche centrée utilisateur pour la création de langages. Le processus proposé permet de valider le langage avec ses futurs utilisateurs : parties prenantes, concepteurs, développeurs, etc. Il repose sur un certain nombre de bonnes pratiques ou de recommandations qui ont pu être faites dans la littérature comme celles définies par (Aranda *et al.*, 2007) et (Patig, 2008) proposant des protocoles expérimentaux applicables à n'importe quel langage pour évaluer leur facilité de compréhension.

Une autre piste intéressante pour appréhender la complexité des modèles est de considérer leur notation comme un élément essentiel de leur compréhension et de leur manipulation. (Moody, 2009) décrit la physique des notations en énonçant neuf principes pour concevoir des notations visuelles cognitivement efficaces. Nous pouvons citer, à titre d'exemple, la transparence sémantique, qui définit dans quelle mesure la signification d'un symbole peut être déduite de son apparence. Les symboles doivent donc fournir des indices sur leur sens : la forme exprime le contenu. Ce concept est proche de celui d'affordance en interaction homme-

10. Trad. de l'anglais.
11. Ex : le choix de symboles appropriés pour faciliter la lisibilité.

machine ; l'affordance cherche la transparence dans les actions possibles pour l'utilisateur alors que la transparence sémantique vise la facilité de compréhension des concepts.

Il peut être également étudié la possibilité d'appliquer les principes de la sémiologie graphique définie par Jacques Bertin pour les représentations graphiques de modèles telles qu'on les rencontre en IdM. Pour (Bertin, 1999), l'objectif d'un diagramme est de transcrire graphiquement une ou plusieurs informations. Le concepteur doit être conscient du fait que lorsqu'un utilisateur procède à la lecture de son diagramme, celui-ci s'engagera dans un processus de recherche d'information. Aussi, le concepteur doit donc s'adresser à l'utilisateur en mettant en avant, dans sa transcription graphique, la *question principale* à laquelle répond son diagramme. Ensuite, si le concepteur juge qu'une partie de son diagramme retranscrit des éléments relatifs à des *questions secondaires*, les éléments graphiques concernés devront être eux-aussi mis en exergue. Cette logique vaut de manière récursive pour tous les niveaux inférieurs de questionnement. Pour ce faire, Jacques Bertin propose d'exploiter les capacités de notre système visuel à percevoir *la profondeur* de plan des objets dans l'espace. En exploitant ainsi le système perceptif, le travail cognitif à réaliser en sera allégé et les différents niveaux de lecture pourraient apparaître spontanément. Les variables visuelles sont divisées en deux : les *variables musculaires* qui nécessitent le déplacement des yeux soient *x* et *y* et les *variables rétiniennes* qui ont un impact sur notre perception de la profondeur soit la taille, la forme, le grain, la valeur, la couleur et l'orientation. Chacune de ces variables n'a pas le même pouvoir de mise en perspective mais peut avoir un pouvoir d'association, de dissociation et de sélectivité. Par exemple, la taille a un fort pouvoir d'ordonnancement ; dans un diagramme de classes, l'augmentation significative de la taille de la police de caractères utilisée pour l'affichage du nom des paquetages peut permettre de mettre en avant les paquetages vis-à-vis des classes. La couleur, si souvent vue comme un moyen intéressant pour faire une syntaxe concrète efficace, n'a pas quant à elle de pouvoir d'ordonnancement. Par contre, comme elle encourt une forte *excitation sensorielle*, elle profite d'un pouvoir attractif réel doublé d'un pouvoir de sélection : séparation des éléments de différents types. Pour retranscrire divers niveaux de lecture, la taille se révèle cette fois plus pertinente que la couleur. En revanche, sur un même plan de lecture, la couleur se verra plus efficace pour isoler et distinguer les éléments entre eux ménageant ainsi les efforts cognitifs de dissociation que fournira l'utilisateur.

Un premier travail visant l'application des principes de la sémiologie graphique en IdM[12] a été initié au travers de la définition de métriques pour l'éditeur de méta-modèles et modèles ModX (Le Pallec *et al.*, 2011 ; 2012). Ces métriques visent principalement les variables rétiniennes définies plus haut et se concentrent sur la *discriminabilité perceptive* de Daniel Moody : est-ce que chaque type d'élément est visuellement assez différent des autres types ? Nos travaux en cours visent notamment une retranscription des principes fondamentaux de la sémiologie graphique. Ils offrent aujourd'hui d'identifier les questions auxquelles répondent les

12. Pour une amélioration de l'efficacité des formalismes graphiques (syntaxes concrètes).

divers types de diagramme, de les hiérarchiser puis d'utiliser les variables rétiniennes pour retranscrire graphiquement cette hiérarchie.

La maîtrise de la complexité croissante des modèles passera nécessairement par l'aménagement de solutions applicatives adaptées : représentation, visualisation et manipulation de modèles complexes. Dans cette perspective, nous proposons de considérer, au chapitre suivant, trois principaux leviers de développement jouant d'une pleine complémentarité : de l'*écologie* des interfaces (Vicente, 2002) ; de l'*efficience* des représentations-visualisations interfacées ; de l'*adaptation* de l'interface à l'utilisateur.

3. Contributions croisées en IHM : la conception de modèles complexes

3.1. *De l'ergonomie cognitive : pour une écologie des interfaces*

L'approche écologique en ergonomie cognitive a pour originalité d'avoir renversé le point de vue sur la cognition humaine. Refusant de la considérer sous l'angle de processus mentaux internes à un individu, l'approche écologique en ergonomie argue l'idée d'un rôle déterminant de l'environnement sur lequel travaillent un ou plusieurs individus. Dans cette optique, la question-clé pour concevoir une interface écologique se voit être : comment modéliser l'environnement de travail, le domaine, de manière à ce qu'il soit facilement perçu par les *agents*. La réponse à cette question ne se résume pas seulement, dans le cas qui nous occupe, au choix d'une notation graphique facilement lisible par l'utilisateur. Elle nécessite une compréhension approfondie des propriétés du domaine sur lequel travaillent les futurs utilisateurs du SI.

A cet égard, il est en premier lieu essentiel d'appréhender à quels types de complexité se réfèrent le domaine de travail et conséquemment sa modélisation. Trois grandes formes de complexité peuvent être envisagées. La première est stochastique et peut se mesurer, sous l'angle informatique et au sens de Kolmogorov, comme la taille du plus petit programme permettant de générer les données avec une machine universelle de type machine de Turing. Plus le message est aléatoire et plus la programmation de ce message sera complexe et incompressible au sens informatique du terme. Concrètement, elle impliquera la présentation de nombreuses données ou bien des représentations approximatives sous la forme de probabilités et de statistiques. Une seconde forme de complexité est celle émergent de la dynamique de l'interaction entre un nombre élevé d'éléments simples, faisant que le tout devient rapidement supérieur à la somme de ses parties. Cette forme de complexité nécessitera des modèles de simulation dynamique. Enfin, la troisième forme de complexité est liée à la structure hiérarchique du domaine modélisé (Simon, 1962). La structure hiérarchique résulte de l'organisation d'un nombre élevé d'éléments composant un système.

L'une des principales difficultés dans la modélisation et le rendu sur une interface d'une complexité fondée sur une structure hiérarchique est qu'elle implique différentes strates simultanées de hiérarchisation, strates souvent confondues. La première strate de hiérarchisation est celle intrinsèque à la structure

du domaine modélisé. Dans la Nature, la hiérarchisation des structures constitutives des corps physiques et biologiques a permis d'aboutir au fil de l'évolution à des formes complexes et stables. D'un point de vue évolutif, la hiérarchisation des structures physiques a permis de contrer les perturbations environnementales qui ont pu de temps en temps détruire le travail de composition effectué (Simon, 1962). Appréhender cette structure intrinsèque au domaine implique l'explicitation des règles fondamentales dirigeant le domaine de travail auprès d'experts du domaine. Cette explicitation permettra d'élaborer un modèle fondé sur des significations-clés pour contrôler, agir sur le domaine, ce que le cybernéticien (Ashby, 1956) appelait les variables essentielles.

La seconde strate de complexité hiérarchique qui vient recouvrir nécessairement la première est celle liée à la manière dont un observateur appréhende le domaine de travail à un moment donné. Cette hiérarchisation est celle qu'engendre le concepteur à travers la conception d'un modèle sur la base d'une sélection de certaines variables et de postulats tel que celui où toute chose est égale par ailleurs. Par exemple, un livre peut être défini comme composé de chapitres, de sections, de paragraphes, de phrases et de mots. Mais, une autre hiérarchie est envisageable, celle définissant l'ouvrage en épisodes conduisant au dénouement de l'histoire racontée par le livre. La question est donc de modéliser la ou les hiérarchies les plus pertinentes conformément aux attentes et visées.

Enfin, la troisième forme de complexité hiérarchique est celle construite par le concepteur-utilisateur. Sur la base de ses objectifs et de ses connaissances antérieures, ce dernier élabore durant son interaction avec le modèle externe présenté sur l'interface, un modèle mental interne générant une autre hiérarchisation de l'information. Cette hiérarchisation devra trouver à s'accorder au modèle de base généré par le même concepteur.

Si aujourd'hui, les techniques pour expliciter une expertise sur un domaine de travail et concevoir une interface écologique sont assez bien stabilisées, la question de l'identification des différentes formes de complexité auxquelles doit se confronter la conception d'un modèle informatisé subsiste. S'il existe différentes formes de complexité dans l'environnement à modéliser, il ne faut également pas oublier la complexité qu'introduit le concepteur à travers ses choix de modélisation.

3.2. *Du design d'interface : pour une représentation-visualisation efficiente*

L'apport du design d'interface à la modélisation se situe principalement au niveau de la formalisation graphique : quel arrangement formel revient-il de concevoir en vue principalement de visualiser et de manipuler ici des modèles complexes (Bihanic *et al.*, 2012) ? Dans ce cas précis, l'interface graphique doit parvenir à résoudre l'expression des différents degrés de complexité des modèles : intrication, distinction, dimension, relation, etc. Ainsi, outre le fait de donner à voir et à manipuler les modèles de manière appropriée ou *efficience*, l'interface doit également permettre d'apprécier leur amplitude ou échelle de complexité sans céder à une simplification ou réduction simplificatrice.

Il convient de rappeler que les choix de formalisation engagent, d'une part, la formation du sens et des significations et déterminent, d'autre part, la cognition[13] ; ces choix concernent ici l'aménagement de formes et symboles graphiques, l'ajout de couleurs en passant par la composition de vues et points de vue jusqu'à l'élaboration d'*interacteurs*[14]. A noter que si le sens s'établit ainsi, il éclora à l'esprit du sujet dans la relation expérientielle qui le lie à l'interface. Autrement dit, c'est dans l'action relevant ici de la conception, de l'annotation et la manipulation de modèles que se réalise tout acte cognitif. C'est d'ailleurs là le *credo* de l'approche *constructiviste* dont se réclament notamment (Lakoff *et al.*, 1980), (Langacker, 1987-1991) en sémantique cognitive, également (Piaget, 1979), (Vygotsky, 1933/Ed 1997), (Rumelhart, 1975), (Rogers *et al.*, 2004) en psychologie et plus particulièrement (Denis, 1989) en psychologie cognitive lequel interroge la relation de l'image mentale et matérielle au langage et à la cognition. Ce dernier démontre clairement que « l'image n'est pas le "lieu" de la signification [mais bien plutôt sa mise en forme] (...) la signification [précise-t-il] est le produit d'un 'calcul', et un produit sur lequel pourront être effectués d'autres calculs (comme les inférences) » (Denis, 1989). En d'autres mots, cela reviendrait à considérer, dans le cas qui nous occupe, que la qualité de toute représentation interfacée reposerait essentiellement sur la bonne correspondance ou adéquation entre une organisation formelle des modèles conceptualisant des données, d'un côté, et des logiques d'action sur ces modèles, de l'autre. De cet équilibre découlerait alors la production de la signification donnant à voir et à comprendre les modèles dans leur pleine complexité ; si la représentation interfacée en compose le moyen, la relation expérientielle à l'interface quant-à-elle en définit le lieu, celui d'un *surgissement* du sens appelant à la compréhension. Ainsi, il y a bien une relation de subordination entre l'interface, sa mise en forme et les modalités de l'action, entre la visualisation d'une abstraction et sa définition, entre la représentation d'un modèle et son traitement (Gutwenger *et al.*, 2003) (Kagdi *et al.*, 2007) (Lange *et al.*, 2007). C'est pourquoi, il importe dans le cas de la visualisation et manipulation de modèles complexes d'œuvrer en faveur d'un renouvellement des techniques et procédés de représentation-visualisation *interfacique*. Car c'est au travers d'une telle rénovation que de nouvelles appréhensions cognitives se réaliseront[15].

C'est à cela que s'attèlent nos travaux en design d'interface[16] : concevoir, créer de nouveaux langages formels, de nouveaux schèmes et processus de représentation-visualisation de modèles conceptuels en vue d'offrir d'autres solutions et modalités de traitement – des langages graphiques et formels de modèles conceptualisant des données au départ desquels il s'agit de raisonner différemment (Bihanic *et al.*, 2012). Pour ce faire, nous élaborons de nouvelles interfaces 2-3D post-WIMP[17] (Bihanic, 2003) déployant des représentations idiomatiques originales. Rompant définitivement avec les conventions déjà plusieurs

---

13. De la compréhension à l'action qui en découle.
14. Renvoyant à l'instrumentation graphique offerte à l'utilisateur au sein de l'interface.
15. Les dispositions actuelles souffrant de n'être plus tout à fait satisfaisantes dans le cas du traitement de modèles complexes.
16. Recevant comme sien une part de l'héritage de l'InfoVis.
17. Cf. Post- "Windows, Icons, Menus, and Pointing Devices".

fois séculaires[18], ils s'essayent à de toutes nouvelles représentations interfacées ouvrant à d'autres réalités perceptives et mises en situation de l'action. Inaugurant ainsi de véritables environnements visuels de modèles, ces représentations relèvent d'un *encodage* des processus sous forme d'objets graphiques. Elles associent alors à chaque variable issue des modèles une variable graphique : une position, une longueur, une aire, une couleur, une luminosité, une saturation, une forme, une texture, un angle, une courbure, etc. L'évolution de ces objets dans le temps et dans l'espace[19] renvoyant à une modification dynamique de variables permettrait ainsi de parer à une complexité croissante des modèles (cf. Wettel *et al.*, 2008 ; 2011). Mobilisant plus fortement la capacité de traitement humain par le couplage de la vision[20] et de l'action, il en résulterait une meilleure adaptation perceptivo-cognitive de l'utilisateur aux *aléas* de l'environnement, c'est-à-dire à la variabilité des modèles, à leur évolutivité et dynamisme au-delà des seuils repérés : surcharge et désorientation cognitive. A cette plus-value, s'ajoute celle de la création d'interacteurs d'un registre tout à fait nouveau offrant une saisie directe des objets à l'écran ("touch/drag and…") pour une meilleure continuité ou contiguïté de la perception en direction de l'action.

3.3. *De l'ingénierie des SI : pour une meilleure adaptation à l'utilisateur*

Le concept d'adaptation relève d'une conformation des interfaces de visualisation et de manipulation de l'information aux besoins rencontrés par l'utilisateur en opposition au développement standardisé. Cette dernière s'appuie sur certaines notions comme la *caractérisation de l'utilisateur*, la *tâche* et plus largement le *contexte*. La caractérisation de l'utilisateur vise la constitution d'un modèle de l'utilisateur. (Kobsa, 2001) indique que ces modèles doivent reposer sur certaines caractéristiques pertinentes lesquelles concernent notamment les données démographiques, le niveau de connaissances ainsi que l'expérience acquise par l'utilisateur du domaine concerné, les objectifs et plans relatifs aux intentions visées par l'utilisateur ou bien encore les centres d'intérêts, de préférences exprimés, etc. – à noter que (Toker *et al.*, 2012) proposent une étude très instructive concernant l'impact des caractéristiques des utilisateurs sur l'organisation de l'interface de visualisation de systèmes complexes. La tâche conditionne, quant à elle, la façon dont les utilisateurs vont utiliser, fréquenter l'interface ainsi que le choix des outils[21] qu'il reviendra de lui adjoindre ; en somme, la caractérisation de l'utilisateur permet de connaître à l'avance "QUI sera l'utilisateur de l'interface", la tâche offre de savoir par anticipation "POUR QUOI, et à QUELLES FINS celui-ci l'utilisera". Enfin, le contexte est une notion plus large que les deux précédentes et plus floue à certains égards. (Bazire *et al.*, 2005) présentent plus de cent cinquante définitions

---

18. Cf. les modèles de représentation diagrammatique (Playfair, 1786), radiale (Nightingale, 1858) et figurative (Minard, 1869 ; Friendly, 2006), etc.
19. Celui tracé par la représentation interfacée.
20. Prenant en compte le traitement pré-attentif de certaines primitives visuelles.
21. Fonctions, fonctionnalités et instrumentation graphique.

différentes[22] du contexte suivant différents cadres applicatifs. En ce qui nous concerne, nous avons retenu préférentiellement la définition du contexte proposée par (Chaker, 2012) : « le contexte d'un objet correspond à toutes les dimensions contextuelles pouvant avoir un impact sur cet objet ». Ici, le périmètre du contexte de l'interface comprend à la fois l'utilisateur décrit par ses caractéristiques et la tâche qu'il doit réaliser ; ce qui induit que tout changement de tâche opéré par un même utilisateur peut avoir des incidences tout à fait significatives sur la façon dont il doit utiliser l'interface et conséquemment sur l'interface elle-même. Une troisième dimension est omniprésente dans la définition du contexte. Il s'agit de la notion d'environnement. Qu'ils soient liés aux conditions extérieures[23] ou aux matériels[24] supportant l'interaction entre l'interface et l'utilisateur, les éléments qui caractérisent l'environnement peuvent avoir un impact direct sur l'utilisation de l'interface. Considérer le contexte d'utilisation de l'interface permet alors d'en parfaire son adaptation de sorte que celle-ci réponde au mieux aux attentes et s'accorde aux buts de l'utilisateur dans le cadre de l'accomplissement de sa tâche. La prise en compte de ces éléments peut intervenir à deux niveaux :

– soit tout au long des phases de conception et de développement de l'interface. Pour ce faire la mise en place de processus d'ingénierie des besoins, d'ingénierie des exigences et/ou de méthodes agiles est requise. Il s'agit là d'une *approche d'adaptation a priori* ;

– soit au cours de l'utilisation de l'interface. Cela suppose que l'interface soit adaptative selon le contexte : une prise de décision donne lieu à une adaptation de l'interface. Il s'agit cette fois d'une *approche d'adaptation a posteriori*.

L'adaptation des interfaces de visualisation et de manipulation de modèles complexes ne va pas de soi, précisément lorsque l'on souhaite tenir compte du contexte dans sa globalité et que l'on projette d'en maîtriser sa grande variabilité : utilisateur, tâche, environnement. Dans le cadre de l'adaptation a posteriori, il est nécessaire de collecter, de capter et de valoriser les informations utiles en vue de définir le contexte. Sur la base de cette définition, l'interface conclura seule s'il y a lieu ou non d'entamer certaines adaptations. Une telle prise de décision peut reposer sur des connaissances incluses *a priori* dans l'interface ou être apprises, acquises par l'interface tout au long de ses séquences d'utilisation[25]. Pour exemple, (Chaker *et al.*, 2011) proposent un modèle de contexte métier comme base de systèmes adaptatifs et proactifs d'accès à l'information. Le système analyse la relation entre les actions et interactions réalisées par l'utilisateur et le contexte dans lequel celles-ci sont produites afin d'anticiper sur les futurs besoins de l'utilisateur. Ce type de modèle pourrait tout à fait être transposé dans le cadre des interfaces de visualisation et de manipulation de modèles complexes, lesquelles deviendraient alors auto-adaptatives. Pour ce faire, les données d'action et d'interaction utilisées pourraient renvoyer aux clics[26] ou bien à l'appel de fonctionnalités au travers de

22. Ce qui en dit long sur la latitude d'acception d'une telle notion.
23. Ex : l'éclairage de la pièce.
24. Ex : la taille de l'écran.
25. Ces séquences composant ici la somme des parcours utilisateur.
26. Activation d'objets et/ou d'interacteurs à l'écran via le pointeur souris, etc.

l'instrumentation graphique[27]. En plus de ces données somme toute relativement classiques, (Steichen *et al.*, 2012) proposent, dans le cadre de leurs derniers travaux, de suivre le regard que porte l'utilisateur-concepteur sur l'interface afin d'inférer sa tâche et ses caractéristiques. Dans le même ordre d'idée, (Gelisse, 2011) propose à son tour de détecter l'intention de l'utilisateur au cours de l'interaction : calculs d'inférence. Il s'agirait, dans ce cas, de considérer une adaptation a posteriori pour la visualisation et la manipulation de modèles complexes conformément au processus logique de visualisation savamment détaillé par (Shneiderman, 1996) : « Le processus logique en matière de recherche d'information est le suivant : *aperçu*, *zoom* et *filtrage*, puis *détails* affichés à la demande »[28]. Les principaux enjeux seraient alors :

– *d'adapter l'interaction en fonction du contexte de modélisation* : une des principales visées de l'adaptation est de faciliter le traitement des informations par l'utilisateur. Dans le cas qui nous occupe, la prise en compte du niveau d'expérience de l'interface pourrait permettre d'en configurer l'accès : activation des fonctionnalités les plus simples au plus avancées suivant l'expérience du concepteur-utilisateur.

– *de réduire l'espace des informations visualisées et manipulées* : l'objectif est ici de limiter le nombre d'informations aux plus utiles pour l'utilisateur-concepteur. Des techniques de classification ou de filtrage peuvent alors être usitées. Dans ce cadre, nous pouvons citer les travaux présentés par (Dodo, 2008) proposant une interface d'administration de système complexe implémentant une fonctionnalité de filtrage des événements en vue d'afficher les plus pertinents pour l'utilisateur ; de tels aménagements s'avèreraient ô combien utiles pour la visualisation et la manipulation de modèles complexes.

– *d'offrir le meilleur point de vue des informations visualisées* : aider l'utilisateur-concepteur à identifier le point de vue qui convient à son activité est l'un des enjeux importants de l'adaptation. En effet, les mêmes informations peuvent être visualisées selon différents points de vue via différentes visualisations. Ces visualisations complémentaires et synchronisées, comme celles proposées par (Cabanac *et al.*, 2010), permettraient d'offrir au concepteur-utilisateur d'analyser plus aisément les informations visualisées. Cependant, aujourd'hui l'utilisateur décide essentiellement seul de la vue ainsi que du point de vue qu'il souhaite utiliser selon son contexte. Une approche permettant de juger de l'adéquation entre les contextes et les différentes interfaces de visualisation pourrait être mise en place. Cela offrirait notamment l'avantage d'automatiser le changement de points de vue. A titre de premier exemple, (Bonnel *et al.*, 2011) proposent une architecture permettant de mesurer cette adéquation de l'interface au contexte. Une fois encore, ces apports pourraient être d'un grand recours dans le cas de la visualisation de modèles complexes. Plus largement, il y a lieu de penser qu'une transposition même partielle des solutions expérimentées en IHM rencontrerait une très forte plus-value dans le cas de la visualisation et de la manipulation de modèles, et plus encore de modèles complexes.

---

27. Sélection d'items au sein de menus, de palettes d'outils, etc.
28. Trad. de l'anglais.

4. Conclusion & synthèse

Au sein du présent article, nous avons dégagé certains des problèmes parmi les plus persistants en matière de modélisation de SI pour lesquels une réelle résolution se fait désespérément attendre[29]. Nous avons prouvé que la réponse à ces problèmes ne pourra venir de l'arrangement de solutions existantes mais oblige notamment à refonder les paradigmes d'écriture des modèles. Aussi, nous nous sommes efforcés collectivement de pointer, au travers d'une mosaïque de contributions interdisciplinaires[30], qu'une telle rupture paradigmatique devait occasionner un rapprochement du monde de l'ingénierie des SI avec celui des IHM. Car c'est bien de cette rencontre que naitra, nous l'avons démontré, des pistes de résolution et de développement nouvelles remédiant aux principaux points d'achoppements que recouvrent la représentation, la visualisation, la manipulation et plus largement l'appréhension de modèles complexes.

Par ailleurs, outre la complémentarité des disciplines, nous avons clairement mis en évidence le fait que la conception de modèles complexes peut et doit tirer un meilleur parti des approches centrées utilisateur (Ergonomie, Design) se réclamant de nouvelles tactiques et stratégies de la réception à la fois informationnelle, mais également formelle/esthétique et cognitive.

Les perspectives d'une telle rencontre disciplinaire sont nombreuses. Celle que nous avons choisie de suivre nous conduit aujourd'hui à travailler à une étude de cas pour Airbus portant sur la rénovation des approches de conception de systèmes avioniques. De tels systèmes se voient dorénavant décomposés en plusieurs *dimensions*, par composante métier, et niveaux d'abstraction. L'objectif visé est ici d'envisager la construction de visualisations multidimensionnelles orientées utilisateur associant une bonne représentabilité informationnelle ainsi qu'une réelle efficience de traitement. Nous validerons ainsi l'intérêt des techniques de l'IHM et des approches centrées utilisateurs pour la visualisation et la manipulation de modèles complexes.

---

29. Cf. taille critique, forte hétérogénéité, grande évolutivité des modèles, etc.
30. Ingénierie dirigée par les Modèles, Ingénierie de la conception de systèmes, Ergonomie Cognitive et Design d'interface.

5. Remerciements

Les auteurs adressent leurs plus vifs remerciements au comité INFORSID pour l'aide et le soutien accordés dans le cadre de l'Action Spécifique intitulée « Vision utilisateur & expression de la complexité dans les SI » (2012) coordonnée par David Bihanic et Thomas Polacsek.

6. Bibliographie

Aranda J., Ernst N., Horkoff J., Easterbrook S., "A framework for empirical evaluation of model comprehensibility", *Proceedings of MISE'07*, Washington, IEEE Computer Society, 2007, p. 7.

Ashby, W. R., *An introduction to cybernetics*, Chapman & Hall, London, 1956.

Bazire M., Brézillon P., "Understanding context before using it", *Proceedings of Context 2005*, Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, 2005, pp. 29-40.

Bertin J., *Sémiologie graphique. Les diagrammes, les réseaux, les cartes*. Paris, EHESS, 1999.

Bihanic D., Polacsek T., "Models for visualisation of Complex Information Systems", *Proceedings of IV'12 (16th International symposium)*, IEEE Computer Society, Montpellier, 2012, pp. 130-135.

Bihanic D., Polacsek T., *Visualisation de Systèmes d'Informations Complexes*, Studia Informatica Universalis, Hermann, Paris, Vol. 10, N° Spécial : « Modélisation informatique et mathématique des systèmes complexes : avancées méthodologiques », 2012, pp. 235-262.

Bihanic D., "A complete system of tridimensional graphical representation of information: Crystal hy-map", *Proceedings of Cosign'03*, Middlesbrough, 2003, pp. 10-13.

Bonnel N., Chevalier M., Chrisment C., Hubert G., "A Framework to Evaluate Interface Suitability for a Given Scenario of Textual Information Retrieval", *Journal of Universal Computer Science*, Vol. 17, N°6, 2011, pp. 831-858.

Busby J. S., Fan I. S., "The Extended Manufacturing Enterprise: Its Nature and Its Needs", *International Journal of Technology Management*, 1993, pp. 294-308.

Cabanac G., Chevalier M., Chrisment C., Julien C., "Organization of digital resources as an original facet for exploring the quiescent information capital of a communit", *Int. J. Digit. Libr.*, Springer-Verlag, Vol. 11, N°4, 2010, pp. 239-261.

Chaker H., Chevalier M., Soulé-Dupuy C., Tricot A., "Business Context Information Manager: an approach to improve information systems (poster)", *Context'11*, Karlsruhe, Springer-Verlag, 2011, pp. 67-70.

Chaker H., « Une approche de gestion de contextes métiers pour l'accès à l'information », Thèse de doctorat, Université Toulouse 1 Capitole (UT1 Capitole), 2012.

Denis M., *Image et cognition,* Paris, P.U.F., 1989, p. 129.

Dodo M., « Etude de l'apport de la visualisation 3D interactive pour l'administration de systèmes complexes », Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse, 2008.

Friendly M., “The Graphic Works of Charles Joseph Minard”, Université York, [en ligne], (Mise à jour le 22/05/2006), Disponible sur : <http://www.datavis.ca/gallery/minbib.php> (Consulté le 30/01/2013).

Gelisse Y., « Visualisation adaptative d’un système complexe : le cas du corps humain », Master’s thesis, Centre Européen de Réalité Virtuelle (CERV), Technopôle Brest-Iroise, 2011.

Gershenson C., Aerts D., Edmonds B., “*Philosophy and Complexity”*, Worldviews, Science and Us, World Scientific, Singapore, 2007.

Gutwenger C., Jünger M., Klein K., Kupke J., Leipert S., Mutzel P, “A New Approach for Visualizing UML Class Diagrams”, *Proceedings of SoftVis’03*, San Diego, ACM, 2003, pp. 179-188.

Horgan J., *“From complexity to perplexity”*, Scientific American, 1995, pp. 104-109.

Kagdi H. H., Maletic H. H., “Onion Graphs for Focus+Context Views of UML Class Diagrams", *Proceedings of VISSOFT’07*, Alberta, 2007, pp. 80-87.

Kobsa A., “Generic User Modeling Systems”, *User Modeling and User-Adapted Interaction*, Vol. 11, N°1-2, Kluwer Academic Publishers, 2001, pp. 49-63.

Lakoff G., Johnson M., *“Metaphors we live by”*, Chicago, University of Chicago Press, 1980.

Langacker R., *“Foundations of Cognitive Grammar. Theoretical Prerequisites”,* Stanford, Stanford University Press, Vol. 1, 1987.

Langacker R., *“Foundations of Cognitive Grammar”*, Descriptive Applications, Stanford, Stanford University Press, Vol. 2, 1991.

Lange C. F. J., Chaudron M. R. V., Wijns M. A. J., “Supporting Task-Oriented Modeling using Interactive UML Views”, *Journal of Visual Languages and Computing*, Vol. 18, N°4, 2007, pp. 399-419.

Le Pallec X., Dupuy-Chessa S., « Intégration de métriques de qualité des diagrammes et des langages dans l’outil ModX », *Communication à la conférence Inforsid’11 (article court)*, 2011.

Le Pallec X., Dupuy-Chessa S., « Intégration de métriques de qualité des diagrammes et des langages dans l’outil ModX », *Proceedings of CIEL’12*, Rennes, 2012, pp. 1-6.

Lindland O. I., Sindre G., Sølvberg A., “Understanding Quality in Conceptual Modeling”, *IEEE Softw.*, IEEE Computer Society Press, Vol. 11, 1994, pp. 42-49.

Mandran N., Dupuy-Chessa S., Front A., Rieu D., « Démarche centrée utilisateur pour une ingénierie de langages de modélisation de qualité », *Revue Ingénierie des Systèmes d’Information*, numéro spécial « Evaluation des systèmes d’information » (à paraître).

Minard C. J., *« Carte figurative des pertes successives en hommes de l’armée qu’Annibal conduisit d’Espagne en Italie en traversant les Gaules (selon Polybe) »*, Carte figurative des pertes successives en hommes de l’armée française dans la campagne de Russie, 1812-1813. lith. (624 x 207, 624 x 245), 20 novembre 1869.

Moody D. L., Shanks G., “What makes a good data Model? Evaluating the quality of entity relationship models”, *Proceedings of ER 1994*, Manchester, England, Springer, Vol. 881, 1994, pp. 94-111.

Moody D. L., “Theoretical and practical issues in evaluating the quality of conceptual models: current state and future directions”, *Data Knowl. Eng.*, Vol. 55, N°3, 2005, pp. 243-276.

Moody D. L., “The ‘physics’ of notations: Toward a scientific basis for constructing visual notations in software engineering”, *IEEE Transactions on Software Engineering*, Vol. 35, No 6, 2009, pp. 756-779.

Nightingale F., *“Notes on Matters Affecting the Health, Efficiency, and Hospital Administration of the British Army - founded Chiefly on the Experience of the Late War. Request to the Secretary of State for War”*, Impression : Harrison & Sons (copie privée), 1858.

Patig S., “A practical guide to testing the understandability of notations”, *Proceedings of* APCCM’08, Vol. 79, Darlinghurst, Australian Computer Society, Inc., 2008, pp. 49-58.

Piaget J., Chomsky N. (le débat entre), *Théories du langage, Théories de l’apprentissage*, Centre Royaumont pour une Science de l’Homme, Paris, Seuil, 1979.

Playfair W., **“***The Commercial and Political Atlas; Representing, by Means of Stained Copper-Plate Charts, the Exports, Imports, and General Trade of England, at a Single View. To Which are Added, Charts of the Revenue and Debts of Ireland, Done in the Same Manner by James Corry*”, (1ère Ed.) Londres, Debrett J. ; (3ème Ed., 1801) Londres, Wallis J., 1786.

Ricard J., « L’émergence et la complexité biologique », *Journal de la Société de Biologie*, Vol. 199, N°4, 2005, pp. 289-298.

Rogers T. T., McClelland J. L., “*Semantic Cognition: A Parallel Distributed Processing Approach”,* Cambridge, MA, MIT Press, 2004.

Rumelhart D. E., Norman Donald A., *Explorations in cognition*, San Francisco, Freeman, 1975.

Shneiderman B., “The Eyes Have It: A Task by Data Type Taxonomy for Information Visualizations”, *Proceedings of VL’96*, Washington, IEEE Computer Society, 1996, p. 336.

Simon H. A., “The architecture of complexity”, *Proceedings of the American Philosophical Society*, Vol. 106, N°6, 1962, pp. 467-482.

Steichen B., Carenini G., Conati C., “Adaptive Information Visualization - Predicting user characteristics and task context from eye gaze”, *UMAP Workshops*, Vol. 872 de CEUR *Workshop Proceedings*, CEUR-WS.org, 2012.

Toker D., Conati C., Carenini G., Haraty M., “Towards adaptive information visualization : on the influence of user characteristics”, *Proceedings of UMAP’12*, Adaptation, and Personalization, Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, 2012, pp. 274-285.

Vicente K. J., “Ecological Interface Design: Progress and challenges”, *Human Factors*, Vol. 44, 2002, pp. 62-78.

Vygotski L. *Pensée et langage*, Paris, La Dispute, 1997 (Rééd.).

Wettel R., Lanza M., Robbes R., “Software Systems as Cities: A Controlled Experiment”, *Proceedings of ICSE’11*, Hawaii, ACM, 2011, pp. 551-560.

Wettel R., Lanza M., “Visual Exploration of Large-Scale System Evolution”*, Proceedings of WCRE’08*, Antwerp, IEEE Computer Society, 2008, pp. 219-228.