

Chapitre 11

Fertilisation croisée entre interaction personne-système et IA

L'interaction personne-système et l'intelligence artificielle sont deux disciplines qui ont suivi des trajectoires parallèles au cours du temps tout en se rejoignant et se complétant naturellement sur différents domaines aux problématiques riches depuis une quarantaine d'années. Sans souci d'exhaustivité mais plutôt de représentativité, après avoir dressé un historique des interfaces entre interaction personne-système et intelligence artificielle, particulièrement focalisé sur la genèse, ce chapitre passe en revue quatre domaines sources de fertilisation croisée. Les interfaces utilisateur dites intelligentes sont un premier domaine typique à ce sujet. Parmi les nombreuses approches possibles d'interaction intelligente, les agents conversationnels animés affectifs constituent un domaine à part. La capitalisation, la formalisation et l'exploitation de connaissances ergonomiques pour la conception et l'évaluation des systèmes interactifs débouchent sur des travaux combinant nécessairement méthodes et modèles de l'interaction personne-système et de l'intelligence artificielle. La synergie entre visualisation et fouille de données est également mise en avant dans ce chapitre.

11.1 Introduction

Ce chapitre a pour objectif d'étudier les interfaces entre interaction personne-système¹ et intelligence artificielle (IA), mais peut aussi être vu comme un plaidoyer d'association de ces deux domaines. L'objet principal de l'IA est de créer et développer des systèmes intelligents, c'est-à-dire capables de percevoir, de raisonner, d'agir et d'apprendre par eux-mêmes. Cet objectif fondamental a permis de développer des méthodes, techniques et outils permettant, de manière limitée mais effective, de percevoir, de raisonner, d'agir et d'apprendre. Cependant, l'objet initial de l'IA et l'ambition de ce champ de recherche ont de facto inscrits ses travaux sur un

Auteurs : CHRISTOPHE KOLSKI, GUY BOY, GUY MÉLANÇON, MAGALIE OCHS et JEAN VANDERDONCKT.

1. Même si le terme communément employé dans la communauté francophone est encore plutôt "interaction homme-machine" (cf. <http://www.afihm.org/>, le site de l'Association Francophone d'Interaction Homme-Machine), voire "interaction humain-machine", nous avons choisi d'utiliser "interaction personne-système" dans ce chapitre.

calendrier à long terme. Ainsi, la robotique a fait des progrès considérables ; le plus récent est certainement le robot “Curiosity” actuellement en activité sur la planète Mars. L’interaction personne-système, de son côté, s’est centrée sur la facilité d’utilisation des nouvelles technologies en promouvant la créativité et l’innovation. L’interaction personne-système a toujours eu des objectifs à beaucoup plus court terme. Encore faut-il noter que les télé-opérations avec Curiosity depuis la Terre ne peuvent pas se faire sans interfaces utilisateur basées sur de solides notions d’Interaction personne-système, en particulier en ce qui concerne la planification de ses activités. En d’autres termes, les ingénieurs téléopérateurs de la NASA doivent avoir la meilleure conscience de la situation possible sur comment les instruments de Curiosity peuvent être utilisés et quelles sont les ressources que ses diverses activités vont consommer².

Il est utile de constater que l’IA et l’interaction personne-système ont en commun la prise en compte de l’humain comme modèle. D’un côté, l’IA tente de mimer l’humain et rationaliser ses comportements pour construire différents types de systèmes intelligents, incluant des robots. D’un autre côté, l’interaction personne-système tente de comprendre l’humain pour mieux adapter les machines pour une utilisation plus facile, sûre, efficace et confortable. L’IA s’intéresse aux mécanismes internes d’une intelligence rationnelle, alors que l’interaction personne-système se focalise sur les phénomènes fondamentaux de l’interaction entre les humains et les outils qu’ils ont créés et qu’ils utilisent.

Force est de constater que, de nos jours, les spécialistes de l’interaction personne-système utilisent de plus en plus de techniques de l’IA pour améliorer l’interaction. Ils utilisent des techniques d’apprentissage automatique pour la contextualisation des recherches sur le Web par exemple. Les spécialistes de l’IA ont besoin d’interfaces utilisateur adaptées afin de pouvoir utiliser les systèmes intelligents développés. L’interaction humain-robot est un excellent exemple de cette fusion des deux disciplines. L’écrivain Isaac Asimov avait en 1941 très bien décrit les lois principales de l’interaction humain-robot : “(Loi 1) un robot ne peut blesser un être humain ni, restant passif, laisser cet être humain être exposé au danger ; (Loi 2) un robot doit obéir aux ordres donnés par les êtres humains, sauf si ces ordres sont en contradiction avec la Loi 1 ; et (Loi 3) un robot doit protéger sa propre existence dans la mesure où cette protection n’entre pas en conflit avec les Loi 1 et 2.” (Asimov, 2008). Nous retrouvons ici des notions de sécurité, efficacité et confort propres à l’interaction personne-système.

Cette association de l’interaction personne-système et de l’IA émerge progressivement autour des exigences sans cesse accrues de sens, de connaissances, de compétences, d’expérience... et finalement de bon sens. Le succès d’une nouvelle technologie vient du fait qu’elle est le produit d’une intégration intelligente et pertinente de diverses méthodes, techniques et systèmes. L’IA offre des outils pour automatiser de façon externe des comportements humains, ainsi que de créer de nouvelles prothèses cognitives (Ford *et al.*, 1997). L’interaction personne-système offre des outils pour une interaction humaine plus sûre, plus efficace et plus confortable avec les technologies résultantes. Il est certainement plus intéressant de se tourner vers une approche plus globale de la conception de systèmes qui intègre à la fois l’intelligence et l’interaction, en considérant de concert l’utilisation de l’informatique et des sciences humaines et sociales pour aller vers une conception anthropocentrée (Boy, 2012).

Dans la seconde partie du chapitre, un historique des interfaces entre interaction personne-système et intelligence artificielle est dressé, en nous focalisant sur la genèse. Les interfaces utilisateur intelligentes sont étudiées dans la troisième partie. Parmi les avancées récentes du

2. <http://hci.arc.nasa.gov/mslice.html>

domaine on retrouve les agents conversationnels animés affectifs, faisant l'objet de la quatrième partie. Des travaux de capitalisation, formalisation et exploitation de connaissances ergonomiques pour la conception et l'évaluation des systèmes interactifs sont décrits en cinquième partie. La sixième est consacrée à la visualisation et à la fouille de données (data-mining). La dernière conclut ce chapitre consacré à la fertilisation croisée entre interaction personne-système et intelligence artificielle.

11.2 Historique des interfaces entre interaction personne-système et IA : la genèse

L'intelligence artificielle (IA) et l'interaction homme-machine (IHM) sont deux branches de l'informatique. Ces deux disciplines à la fois se conjuguent entre elles et sont différentes par leurs objectifs et leurs natures. L'IA étudie les agents intelligents, c'est-à-dire toute entité capable de percevoir, inférer et agir sur son environnement en utilisant ses propres connaissances. C'est John McCarthy qui, en 1955, a nommé et défini l'IA comme la discipline scientifique et technique qui permet de construire des machines intelligentes. Alors que l'IHM étudie les dispositifs à mettre en œuvre pour contrôler et communiquer avec une machine, ou avec d'autres personnes par l'intermédiaire d'une machine. ACM-SIGCHI³ donne à ce sujet la définition suivante : "L'interaction humain-ordinateur est une discipline qui s'intéresse à la conception, l'évaluation et la mise en œuvre de systèmes informatiques interactifs utilisés par des êtres humains et à l'étude des phénomènes majeurs qui l'entourent⁴." (Hewett *et al.*, 1992). Le terme Interaction Homme-Machine, encore communément utilisé, est d'ailleurs mal choisi parce qu'il s'agit désormais toujours de dispositifs fortement informatisés (la terminologie anglo-saxonne, Human-Computer Interaction, est d'ailleurs plus précise sur le sujet : la machine est en réalité un ordinateur). L'IHM a pour objet l'interaction entre agents, et non l'intelligence des agents eux-mêmes, même si celle-ci doit toujours être prise en compte au moment de la conception comme tout au long du cycle de vie du produit. De plus, si nous utilisons la définition d'ACM-SIGCHI, la notion de "système informatique interactif", et plus simplement de "système", est certainement de plus en plus adaptée. Nous pouvons donc parler d'interaction personne-système (terme que nous avons choisi d'utiliser dans ce chapitre), et même d'intégration personne-système.

Il est certainement intéressant de commencer par parler d'automatique avant de parler d'intelligence artificielle. Bien que ces deux disciplines n'appartiennent pas aux mêmes champs scientifiques, elles sont en continuité dans le champ de leur mise en œuvre, c'est-à-dire dans l'industrie. Nous avons automatisé les avions de transport depuis les années trente. Ce type d'automatisation a mis en œuvre des techniques analogiques et ensuite numériques, pour passer à des techniques et outils symboliques. L'automatisation est progressivement devenue une question de génie logiciel. Par exemple, on a vu évoluer les cockpits d'avion d'équipements électroniques à des équipements informatiques. Dans les années quatre-vingt, le système de gestion du vol (*Flight Management System* ou FMS) a été introduit sous la forme d'un système de gestion de base de données à bord des avions de transport commerciaux. Il

3. ACM (Association for Computing Machinery)-SIGCHI (Special Interest Group on Computer-Human Interaction).

4. "Human-computer interaction is a discipline concerned with the design, evaluation and implementation of interactive computing systems for human use and with the study of major phenomena surrounding them."

a permis de libérer l'équipage de tâches de planification du vol et de navigation parce que ce système incluait l'intelligence nécessaire pour donner des résultats que les pilotes avaient l'habitude de générer eux-mêmes. Les méthodes sous-jacentes étaient des systèmes à base de règles et des optimisations de trajectoires. Le problème a été qu'il était souvent plus difficile de manipuler et gérer le FMS que de se servir de cartes, documents papiers, et surtout de sa tête. L'intelligence était passée dans la machine sans que nous ne nous soyons préoccupés des questions d'interaction avec ce nouveau type de système. L'interface était compliquée. Elle introduisait des possibilités d'erreurs d'interaction. Son utilisation était difficile à apprendre et retenir. Bref, si l'automatisation était bonne, l'interaction entre elle et le pilote demandait beaucoup plus de travail. Il a fallu attendre pour avoir une technologie suffisamment mature pour avoir le type d'interface utilisateur que nous connaissons aujourd'hui dans le cockpit de l'A380 par exemple. Il est intéressant de noter que ce type de cockpit s'appelle aujourd'hui "cockpit interactif" non pas à cause de l'interaction avec les systèmes les parties mécaniques de l'avion mais de l'interaction avec l'interface utilisateur de bord, c'est-à-dire une interaction de type pointage sur les écrans.

Dans l'interaction personne-système, il y a "personne". L'entité humaine est difficile à cerner, définir et modéliser. Depuis longtemps, la communauté des facteurs humains et de l'ergonomie (FHE) s'est penchée sur cette question (Woodson et Conover, 1964). On peut caractériser l'humain selon diverses propriétés. Tout d'abord, il a un corps physique et physiologique ; une question que les spécialistes FHE se sont posée depuis la fin de la deuxième guerre mondiale avec le développement de mannequins numériques. Les aspects biomécaniques, la fatigue, l'âge et d'autres facteurs humains ont été et sont toujours largement et profondément pris en compte. Cette ergonomie physique était celle que nous avons connue au début des années quatre-vingt lorsque nous avons dû certifier des cockpits d'avion de transport conçu en pilotage à deux. Nous nous sommes très rapidement aperçus que l'ergonomie physique et physiologique ne suffisait pas et était très limitée au regard de l'évaluation des nouveaux systèmes de bord. Il fallait passer à une ergonomie cognitive capable de servir de support à une analyse du traitement de l'information (Norman, 1986). De plus, les techniques d'automatisation classiques ne suffisaient pas et les techniques d'interaction avec ces systèmes hautement automatisés devenaient "un autre centre du problème". L'interaction personne-système faisait son entrée dans le cockpit, tout comme elle a fait son entrée dans divers domaines des systèmes critiques dans les années qui ont suivi. A l'époque, nous nous focalisions sur le traitement de l'information et c'est pour cela que les sciences cognitives ont pris une ampleur considérable dans le milieu des ingénieurs. L'ergonomie cognitive, et l'ingénierie cognitive, sont devenues des disciplines incontournables pour analyser, mieux comprendre, concevoir et évaluer les systèmes humain(s)-machine(s) modernes. La cognition était devenue un passage obligé, central (Card *et al.*, 1983; Hutchins, 1995; Boy, 1998).

L'approche cognitive a ensuite donné naissance à un autre point de vue, organisationnel celui-là, avec l'introduction des collecticiels et du travail coopératif (le CSCW : *Computer-Supported Cooperative Work*) (Grudin, 1994). Pour les spécialistes de l'interaction personne-système, l'humain devenait un travailleur au sein d'une organisation. L'informatique devenait du coup un support à la gestion administrative et aux affaires. Dans le background, Internet devenait de plus en plus persistant, depuis les travaux de Douglas Engelbart dans les années soixante jusqu'à l'avènement de la Toile (c'est-à-dire du World Wide Web ou Web) en 1992 par Tim Burners Lee et son équipe au CERN à Genève. Le Web a réellement établi un changement des

pratiques au sein de nos sociétés modernes. L'humain est progressivement devenu "informavore" (terme introduit par George Miller en 1983). Les sciences de l'information et de la communication se sont bien sûr saisies de ce nouvel objet et ce nouveau sujet. Il s'agissait alors de mieux gérer les recherches d'informations en utilisant le Web. L'interaction personne-système a coopéré avec l'IA pour générer des logiciels d'optimisation de recherche d'informations et d'apprentissage des habitudes des utilisateurs (Bellot, 2011) (Boy, 1991a). Le Web est devenu le Web sémantique (Berners-Lee *et al.*, 2001; Shadbolt *et al.*, 2006), en ajoutant l'intelligence d'un bibliothécaire universel.

La progression de l'interaction personne-système nous a alors conduits vers une nouvelle étape, celle des réseaux sociaux. L'humain devenait un être social pour les informaticiens de ce domaine. L'introduction de systèmes comme ceux de Google, Facebook, LinkedIn et Twitter a vu émerger de nouvelles pratiques. Plus besoin de structure, les connaissances pouvaient être complètement réparties, nous pouvions les trouver n'importe où et n'importe quand. Les chercheurs et praticiens en sociologie et anthropologie entraient en scène pour étudier ce nouveau type d'environnements.

Les interactions personne-système sont aujourd'hui intrinsèquement sociales mais aussi émotionnelles, l'humain ressentant de nombreuses émotions tant positives que négatives face à un système interactif. L'intelligence artificielle d'un système réside alors aussi dans sa capacité à gérer ces dimensions affectives de l'interaction à travers des interfaces capables de s'adapter au contexte social et aux émotions de l'utilisateur. Cette problématique de recherche a fait naître un courant de recherche de l'informatique se situant à la frontière entre interaction personne-système et IA : l'informatique affective (Picard, 1997).

Où en sommes-nous aujourd'hui ? Le développement des technologies de l'information nous a emmené beaucoup de techniques et d'outils. Certainement trop pour que nous puissions raisonnablement les intégrer facilement en fonction du propos de nos problèmes à résoudre. Il est temps de se poser la question de la signification (meaning). Qu'est-ce qui a du sens ? Nous sommes en train de passer de la problématique du savoir-faire à la problématique du savoir-être. C'est pour cela que le design (au sens intégré de la conception et de l'esthétique) devient progressivement une nécessité dans les sciences de l'ingénieur, et l'informatique en particulier. L'approche design de la résolution de problèmes fait appel à la créativité et non plus à des procédures figées, bloquantes et finalement stériles. Ce qui caractérise notre société du XXI^{ème} siècle c'est certainement la complexité. Sur ce point, l'IA et l'interaction personne-système doivent se rejoindre pour résoudre des problèmes dont la complexité est au centre. Nous devons ensemble converger vers une approche ontologique de la position et résolution de problèmes. En effet, avant de résoudre un problème, il faut savoir bien le poser ! C'est tout l'art de l'abduction, de savoir imaginer des hypothèses et des buts, chercher des opportunités et en définitive chercher le sens (Boy, 2012).

11.3 Interfaces utilisateur intelligentes

Les interfaces utilisateur intelligentes constituent un domaine vaste, riche, résolument à l'intersection de l'Interaction personne-système et de l'intelligence artificielle, mais aussi des sciences cognitives. La recherche sur de telles interfaces utilisateur est apparue dès le début des années 80 (voir par exemple (Edmonds, 1981)), les premiers concepts datant même de la fin des années 70 sous l'angle des approches dites adaptatives. De nombreuses définitions ont

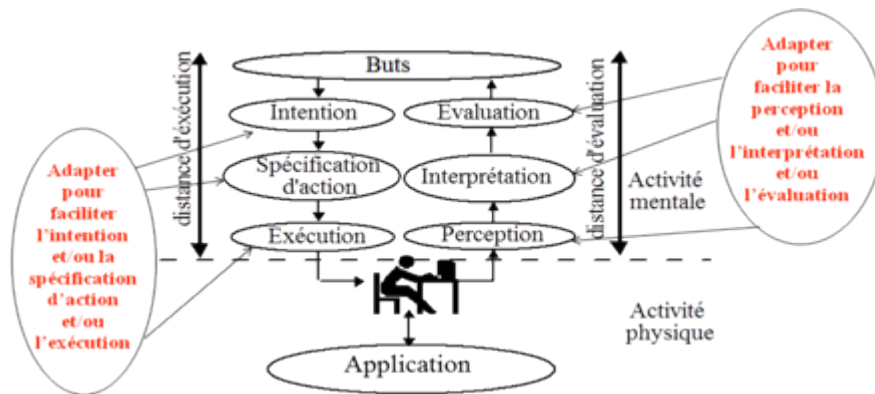


FIGURE 1: Adaptation(s) à la lumière de la théorie de l'Action (adapté de (Norman, 1986))

été proposées dans la littérature. Ainsi (Hancock et Chignell, 1989) les ont définies comme des interfaces visant à apporter des outils aidant à la minimisation de la distance cognitive entre le modèle mental qu'a l'utilisateur de la tâche et la manière dont la tâche est présentée à l'utilisateur via l'ordinateur, lors de sa réalisation. Il nous semble même possible d'aller plus loin que cette définition, car, en partant du modèle de la théorie de l'action de (Norman, 1986), tout en se situant selon une approche d'adaptation (de nombreuses autres ayant été étudiées dans la littérature, cf. ci-dessous), il est possible de situer différentes étapes cognitives, par rapport auxquelles une ou plusieurs adaptations prennent toute leur importance, figure 1.

Parmi les nombreuses autres définitions, on retrouve celle plus large de (Maybury, 1999) : *"Intelligent User Interfaces (IUI) are human-machine interfaces that aim to improve the efficiency, effectiveness, and naturalness of human-computer interaction by representing, reasoning, and acting on models of the user, domain, task, discourse, and media (e.g., graphics, natural language, gesture). IUI are multifaceted, in purpose and nature, and include capabilities for multimedia input analysis, multimedia presentation generation, model-based interfaces, agent-based interfaces, and the use of user, discourse and task models to personalize and enhance interaction. [...]"*.

Par conséquent, le domaine des interfaces intelligentes couvre un champ disciplinaire représentant l'intersection entre l'interaction personne-système, l'ergonomie du logiciel, les sciences cognitives et l'intelligence artificielle, y compris leurs sous-disciplines respectives, telles que la vision assistée par ordinateur, le traitement automatique de la langue, la représentation des connaissances et le raisonnement, l'apprentissage machine, la découverte de connaissance, la planification, la modélisation des agents machine et utilisateur, la modélisation du discours. Il est communément admis que le domaine des interfaces intelligentes représente plus simplement l'intersection entre l'interaction personne-système et l'intelligence artificielle, au même titre que l'ingénierie des systèmes interactifs (en anglais, *Engineering of Interactive Computing Systems – EICS*) représente l'intersection entre l'interaction personne-système et le génie logiciel.

La définition de Maybury est intéressante car elle met en avant que de telles interfaces visent à apporter des solutions relativement à différents critères sous-jacents à l'interaction personne-

système, et qu’elles nécessitent de prendre en compte explicitement plusieurs modèles pour couvrir un ensemble d’étapes en lien avec la perception, la décision et l’action (si on se réfère au modèle PCA bien connu en intelligence artificielle). On y retrouve des problématiques et verrous récurrents liés aussi bien à la reconnaissance des intentions de l’utilisateur (ou groupe d’utilisateurs), à la modélisation de connaissances et préférences, à la communication avec l’utilisateur, et aussi au raisonnement et la prise de décision (quoi présenter, quand, où et à qui le présenter, comment le présenter, et aussi ... pourquoi l’avoir présenté).

Les interfaces utilisateur intelligentes constituent désormais un domaine à part entière. Il est important de souligner qu’une conférence renommée de l’*Association of Computing Machinery (ACM)* leur est consacrée. Celle-ci est intitulée *ACM IUI (Intelligent User Interfaces)*. D’un point de vue historique (voir aussi <http://www.iuiconf.org/IUI/History>), l’idée a démarré d’un workshop organisé en mars 1988 intitulé “*Architectures for Intelligent Interfaces*”, débouchant en 1991 sur le livre “*Intelligent User Interfaces*” édité par J.W. Sullivan and S.W. Tyler, organisateurs du workshop). Après un premier workshop sponsorisé par l’ACM en 1993, IUI est devenu une conférence annuelle à partir de 1997. Dans l’appel de l’édition 2013, notons que les thèmes mis en avant étaient les suivants : *User input ; Generation of system input ; Ubiquitous Computing ; Help ; Personalization ; AI Techniques ; Social Computing ; IUI Design ; User studies ; Semantic Web*. Outre la publication régulière de nombreux livres et articles sur les interfaces utilisateur intelligentes dans différents journaux et conférences, aussi bien en Interaction personne-système qu’en intelligence artificielle, on peut souligner que deux journaux leur sont dédiés : *User Modeling and User-Adapted Interaction* (Springer) ; *ACM Transactions on Interactive Intelligent Systems*.

Il est possible de trouver de nombreuses approches contribuant aux interfaces utilisateur intelligentes dans la littérature. Il n’est pas possible ici de toutes les citer ici, le lecteur intéressé pouvant trouver dans différents ouvrages ou articles de synthèse de plus amples détails à ce sujet (Chignell et Hancock, 1988; Kolski et Le Strugeon, 1998; Höök, 2000; Jameson, 2007) :

- Les approches dites adaptatives sont celles ayant débouché sur le plus de propositions (cf. (Kolski *et al.*, 1992; Schneider-Hufschmidt *et al.*, 1993; Jameson et Gajos, 2012)), l’adaptation se faisant le plus souvent relativement à différentes caractéristiques utilisateur ou à la tâche.
- Dans le prolongement des travaux sur l’adaptation, on trouve ceux portant sur une tendance actuelle qui est de fournir de plus en plus des services personnalisés aux utilisateurs des systèmes d’information au sens large. Il s’agit dans ce cas de s’adapter aux buts (besoins ou raisons ayant mené l’utilisateur à interroger le système), habitudes/préférences (ensemble des critères qui permettent de distinguer une solution d’une autre pour une même requête), capacités de l’utilisateur (englobant aussi bien les capacités matérielles et logicielles à la disposition de l’utilisateur, que de ses propres capacités physiques ou cognitives, liées éventuellement à des handicaps). Il est important que le système apprenne au fur et à mesure des interactions avec l’utilisateur (et d’utilisateurs au profil proche), afin d’affiner la personnalisation, en exploitant par exemple des algorithmes de filtrage collaboratif (Su et Khoshgoftaar, 2009). Les travaux sont nombreux dans ce domaine (Abed *et al.*, 2011; Brusilovsky *et al.*, 2007; Peintner *et al.*, 2008).
- Les interfaces utilisateur intelligentes peuvent être aussi dites tolérantes aux erreurs humaines (Rouse et Morris, 1987; Beka Be Nguema *et al.*, 2000), l’adaptation exploi-

tant une classification des erreurs humaines possibles et de leurs conséquences pour corriger des erreurs humaines ou avertir l'utilisateur de problèmes à ce sujet.

- Une autre catégorie regroupe les assistants à l'utilisateur, au sens large. Ceux-ci sont au service de l'utilisateur, à leur écoute, afin de les assister en cas de problème (Lieberman, 1995) ; un exemple typique étant l'assistant intégré dans différentes versions précédentes d'un environnement bureautique connu, l'assistant étant mis à la disposition de l'utilisateur et le conseillant sur des procédures adaptées (à la demande ou non de celui-ci, par exemple comment repaginer un document). Une telle approche avait été proposée initialement dans le domaine aéronautique, sous la dénomination d'opérateur assistant intelligent jouant le rôle de co-pilote dans un cockpit et raisonnant en parallèle à l'utilisateur considéré comme le décideur final (Boy, 1991a). Afin d'améliorer les interactions personne-système, de les rendre plus naturelles, les choix de conception peuvent porter sur une physionomie humaine de l'assistant, voir à ce sujet la partie "Agents conversationnels animés affectifs" de ce chapitre.
- De nombreuses recherches portent sur le contexte de manière général, les définitions de (Abowd *et al.*, 1999) et (Dey, 2001) à ce sujet étant les plus citées, et les systèmes dits sensibles au contexte. On trouve en fait dans la littérature les qualificatifs suivants : Context-aware et Context-sensitive, qui dénotent le fait d'utiliser le contexte ou celui de s'adapter à celui-ci. Les travaux sont nombreux dans ce domaine (Boy, 1991b, 1992; Winograd, 2001; Coutaz et Rey, 2002; Limbourg *et al.*, 2004; van den Bergh, 2006; Brossard *et al.*, 2011).
- Dans l'approche des interfaces dites plastiques, il s'agit pour celles-ci s'adapter à leur contexte d'usage dans le respect de leur utilisabilité (Thevenin et Coutaz, 1999). Le contexte d'usage concerne aussi bien les caractéristiques de l'utilisateur, de la plateforme d'interaction que de l'environnement (Calvary et Coutaz, 2007; Coutaz et Calvary, 2007).
- Une autre approche plus prospective consisterait à considérer l'interface utilisateur intelligente et son environnement socio-technique comme un système multiagent, selon une approche distribuée de l'interaction personne-système, celle-ci faisant l'objet, de manière générale, de plus en plus de travaux actuellement (Gallud *et al.*, 2011). Une telle interface, suggérée par (Mandiau *et al.*, 1991; Kolski et Le Strugeon, 1998), est composée d'agents, aussi bien réactifs que cognitifs, travaillant en parallèle et/ou co-opérant, dans le but de résoudre différents problèmes relatifs aux tâches à effectuer. Le résultat de leurs traitements est transmis aux utilisateurs, grâce à des actes de communication, mais on peut imaginer tout un ensemble d'autres actions, sur le système par exemple. Ce principe a été mis en œuvre récemment dans le cadre d'une simulation de trafic routier sur table interactive munie de la technologie RFID, les agents virtuels représentant des véhicules réagissant à l'activation d'objets tangibles manipulés par les utilisateurs (Kubicki *et al.*, 2013).

Les domaines d'application des interfaces utilisateur utilisateurs sont multiples, puisque ces dernières peuvent être d'un apport dès lors qu'une aide automatique ou semi-automatique peut être mise en œuvre par le système interactif, tout en prenant en compte différents critères, caractéristiques et/ou préférences centrées utilisateur. Les recherches et développements ont porté aussi bien sur des tâches très ciblées (bureautique, recherche d'information, commerce électronique, etc.) que sur des tâches complexes, voire critiques (transports, supervision, santé).



FIGURE 2: Exemple d'un agent conversationnel animé: l'agent Greta (Pelachaud, 2009). Expressions de joie, tristesse et colère (de gauche à droite).

11.4 Agents conversationnels animés affectifs

L'essor des nouvelles technologies place aujourd'hui les systèmes informatiques, non plus seulement comme simples outils, mais comme compagnons nous assistant dans des tâches quotidiennes de lecture, d'écriture, de jeux, d'apprentissage ou encore de communication avec autrui. Nos ordinateurs incarnent ainsi de plus en plus des rôles typiquement attribués aux humains, tels que celui de professeur, de conseiller ou encore d'animateur. Lorsque ces systèmes interactifs sont dotés de caractéristiques de la communication humaine, les utilisateurs tendent à interagir avec ces derniers comme si ils étaient humains (Reeves et Nass, 1996). Ce rapprochement de la communication humaine dans les interfaces virtuelles peut être atteint en utilisant des artefacts humanoïdes capables de simuler la richesse de la conversation humaine. Les récents progrès dans les technologies informatiques ont rendu possible la création de ces artefacts, appelés *agents conversationnels animés* (ACAs). Un agent conversationnel animé est un personnage virtuel créé par l'ordinateur qui peut converser avec les utilisateurs d'une façon naturelle, similaire à celle appliquée par les humains (Cassell, 2000). Un exemple d'ACAs est illustré à la figure 2.

Les ACAs ne sont pas de simples représentations graphiques humanoïdes mais incarnent (1) des agents cognitifs capables de raisonner sur des représentations sémantiques internes complexes, (2) des agents interactifs capables d'interagir de manière multimodale avec l'utilisateur, et (3) des agents expressifs capables de rendre perceptible, à travers leur comportement verbal et non verbal, un état cognitif et affectif particulier. Ces trois dimensions - cognitive, interactive, et expressive - sont essentielles pour concevoir un ACA permettant d'améliorer l'interaction tant au niveau de la satisfaction de l'utilisateur qu'au niveau de la performance de l'utilisateur dans la réalisation d'une tâche. Par exemple, un certain nombre de recherches montre qu'un agent capable d'exprimer des émotions permet d'améliorer l'interaction (Beale et Creed, 2009). Cependant, la capacité expressive de l'agent n'est pas suffisante : une même

émotion exprimée dans une situation inappropriée durant l'interaction peut avoir un effet néfaste sur la perception de l'utilisateur (Ochs *et al.*, 2012b). Ce sont les trois dimensions, cognitive, interactive et expressive, qui vont permettre à l'agent d'adopter un comportement affectif efficient durant une interaction avec l'utilisateur.

La dimension cognitive d'un ACA sous-entend une représentation des connaissances et une capacité de raisonnement sur celles-ci⁵. Ces connaissances font référence à celles liées au domaine d'application ou à la tâche ; mais aussi à celles liées à la dimension sociale et émotionnelle de l'interaction. Un ACA doit en effet être capable de se représenter et de raisonner sur ses propres émotions et celles de l'utilisateur étant donné un contexte social déterminé. La représentation cognitive des émotions doit inclure une représentation des conditions de déclenchement des émotions, i.e. ce qui peut amener un individu à ressentir une émotion particulière dans une situation donnée. Ces informations pourront être utilisées par l'ACA pour identifier à la fois à quel moment durant l'interaction il peut exprimer quelle(s) émotion(s), et à la fois quelle(s) émotion(s) l'utilisateur peut potentiellement ressentir dans une situation d'interaction. Le déclenchement d'une émotion étant étroitement liée à la réalisation ou l'échec d'un but (Scherer, 2000), une représentation de type BDI (*Belief, Desire, Intention*) des émotions à travers une abréviation syntaxique d'une combinaison d'attitudes mentales est particulièrement bien adaptée à cette problématique⁶. Une telle formalisation a par exemple permis de développer un ACA capable d'exprimer de l'empathie envers l'utilisateur durant un dialogue (Ochs *et al.*, 2012b) ou encore un tuteur virtuel capable d'adapter sa stratégie pédagogique aux émotions inférées de l'utilisateur (Jaques et Vicari, 2004). D'autres méthodes ont été proposées pour représenter les émotions. Pour traduire l'aspect dynamique et le caractère non déterministe des émotions, une représentation à partir de réseaux - réseau bayésien (de Melo *et al.*, 2012) ou réseau dynamique de croyance (deRosis *et al.*, 2003) par exemple - ont été développés.

De plus, les émotions d'un agent peuvent être utilisées pour déterminer le comportement approprié dans un environnement virtuel. Les émotions sont alors intégrées dans le système de prise de décision pour la sélection d'actions (Canamero, 2003). S'inspirant de la théorie de coping selon laquelle les individus emploient des stratégies cognitives pour faire face à leurs émotions (Lazarus, 1991), l'impact des émotions sur le comportement d'un ACA peut être modélisé via une modification de son état mental, i.e., de ses croyances, désirs et intentions au sens BDI du terme (Gratch et Marsella, 2004). Par exemple, face à une émotion négative, l'ACA peut adopter une stratégie d'acceptation où il reconnaît l'évènement négatif comme inéluctable et choisit alors d'abandonner l'intention qui, par son échec, a déclenché l'émotion négative.

En perpétuelle interaction avec l'utilisateur, les connaissances émotionnelles de l'agent doivent être enrichies par le déroulement de l'interaction. En effet, même si une formalisation des émotions peut permettre d'inférer les émotions de l'utilisateur, un système de reconnaissance en temps réel des émotions exprimées par l'utilisateur permet de valider, réfuter ou encore affiner ces connaissances, en particulier sur l'effet des actions de l'agent sur les émotions de l'utilisateur. Durant une interaction, l'utilisateur exprime ses émotions à travers son comportement non verbal (e.g., les expressions faciales et la tonalité de la voix), son comportement

5. Le lecteur peut se référer au volume 1 de cet ouvrage pour un panorama des méthodes en intelligence artificielle de représentation des connaissances et de raisonnement.

6. Un exemple d'une formalisation BDI des émotions est proposé au chapitre I.16.

verbal (e.g., l'utilisation de mots empreints d'émotions) et à travers des signaux physiologiques (e.g. le rythme cardiaque ou la conductivité de la peau). Les systèmes de reconnaissance automatique des émotions reposent sur un apprentissage préalable des caractéristiques non verbales, verbales ou physiologiques des états affectifs à partir de données réelles d'individus ressentant ou exprimant des émotions. Par exemple, des corpus audio-visuels peuvent être collectés pour analyser les caractéristiques faciales, gestuelles et sonores des émotions exprimées par des individus. Les corpus d'expressions d'émotions sont généralement manuellement annotés avec des types d'émotions et éventuellement des valeurs d'intensités. Une méthode pour extraire les connaissances de ces corpus consiste à utiliser des algorithmes d'apprentissage⁷ supervisés pour corrélérer des caractéristiques expressives, par exemple l'activation de muscles du visage ou des paramètres acoustiques, à des émotions types et des intensités (Caplier, 2010; Clavel et Richard, 2010).

Les méthodes d'apprentissage automatique sont aussi utilisées pour la synthèse des comportements expressifs d'un ACA. L'analyse de données réelles d'interactions interpersonnelles renseignent en effet à la fois sur la manière dont peut être exprimé un état affectif ou cognitif particulier à travers l'expression faciale, les gestes ou encore la posture ; mais renseigne aussi sur la manière dont des individus coordonnent leurs comportements non verbaux. Dans cette problématique d'apprentissage pour la synthèse de comportement d'ACAs, deux approches peuvent être envisagées. Des algorithmes d'apprentissage dits "boîtes noires"⁸ peuvent être utilisés pour modéliser des comportements non verbaux réflexes ou étroitement liés à une autre modalité. Par exemple, un modèle de Markov caché est appris pour prédire des mouvements de tête (Lee et Marsella, 2009) ou pour la synchronisation des mouvements de lèvres avec la parole (Hofer et Richmond, 2010). Des algorithmes d'apprentissage dits "boîtes blanches" seront plus particulièrement utilisés pour extraire des connaissances qui seront ensuite explicitement représentées dans l'ACA. Par exemple, une méthode de classification par arbre de décision a été utilisée pour identifier les caractéristiques morphologiques et dynamiques de différents types de sourires d'ACA (amusé, poli et embarrassé) (Ochs *et al.*, 2012a). Pour traduire la variabilité expressive des émotions, des modèles représentant l'incertitude d'activer certains muscles du visage ou certains gestes, à partir de règles de logique floue par exemple (Niewiadomski et Pelachaud, 2007), ont été proposés.

En définitive, la conception d'un agent conversationnel animé affectif implique des problématiques inhérentes à l'intelligence artificielle de représentation des connaissances, de prise de décision, de planification et d'apprentissage. Ces problématiques appliquées au phénomène complexe qu'est l'émotion visent à intégrer dans les systèmes interactifs une intelligence dite émotionnelle (Salovey *et al.*, 2000), essentielle pour une optimisation des interactions personne-système.

7. Les modèles d'apprentissage sont présentés en détail au chapitre I.9.

8. Les algorithmes d'apprentissage "boîte noire" désignent les algorithmes dont les sorties ne sont pas interprétables, par exemple les réseaux de neurones ou les Systèmes Vecteurs Machine (SVM).

11.5 Capitalisation, formalisation et exploitation de connaissances ergonomiques pour la conception et l'évaluation des systèmes interactifs

La conception et l'évaluation des systèmes interactifs sont des domaines très actifs depuis plus d'une trentaine d'années en raison d'une motivation profonde : pouvoir formaliser les connaissances d'ordre ergonomique afin de les intégrer dans un cadre de référence computationnel qui soit capable de les exprimer à un haut niveau d'abstraction, de les mesurer, de les tester et de corriger toute enfreinte à ces connaissances. Ceci afin de sortir de l'empirisme dans lequel ces connaissances seraient appliquées de manière opportuniste avec des niveaux de rigueur variables. Par exemple, (Ivory et Hearst, 2001) a observé que des logiciels d'évaluation automatique des règles d'accessibilité du W3C produisent des résultats variables en fonction des outils sur un même site web. Il y a plusieurs raisons possibles : les connaissances ergonomiques ne sont pas formalisées, si elles le sont, elles le sont de manière variable, surtout en fonction d'interprétation et de méthodes différentes.

Rien que pour la spécification (au sens large), (Jambon *et al.*, 2001) recense et classifie plusieurs dizaines de méthodes et techniques à ce sujet, selon : une vision psycho-ergonomique, une vision de l'ingénierie des systèmes interactifs, une vision du génie logiciel. (Vanderdonckt et Coyette, 2007), de même que (Beaudouin-Lafon et Mackay, 2003), quant à eux, recensent de nombreuses techniques et outils contribuant au maquettage et au prototypage des interfaces utilisateur (facilitant les évaluations précoces). Depuis les années 80, les recherches se sont orientées sur la proposition de premières approches de développement à base de modèles, dans laquelle une grande partie du travail du concepteur consiste à décrire différents modèles (du domaine, des tâches, de l'utilisateur ...) servant de base à la génération semi-automatique du logiciel interactif ou, tout au moins, au guidage rigoureux de son développement ; la littérature est abondante à ce sujet (Szekely, 1996; Vanderdonckt et Puerta, 1999; Paterno, 1999; Kolski et Vanderdonckt, 2002), ... Par la suite, les recherches se sont orientées vers des méthodes intégrées interaction personne-système alliant le génie logiciel, particulièrement l'ingénierie dirigée par les modèles, (MDA - Model Driven Architecture), dans la lignée de travaux menés par l'*Object Management Group* (www.omg.org). La plupart de ces travaux suivent une conception basée sur les modèles selon une approche descendante. Ainsi les modèles sont raffinés par transformations jusqu'au code. Le cadre de référence *Cameleon* (Calvary *et al.*, 2003) a récolté un consensus dans la mesure où il en donne un bon éclairage en répertoriant quatre niveaux d'abstraction pour les modèles (niveau concernant les tâches et les concepts, l'interface abstraite, l'interface concrète, l'interface finale). Le cadre de référence *Cameleon* (en anglais, *Cameleon Reference Framework – CRF*) est d'ailleurs devenu une recommandation du W3C en ce qui concerne le développement d'interfaces web (González Calleros *et al.*, 2010). De nombreux documents illustrent ce domaine, voir par exemple (Jacob *et al.*, 2004; Calvary *et al.*, 2008; Seffah *et al.*, 2009; Hussmann *et al.*, 2011), etc.

L'évaluation des systèmes interactifs, sous l'angle particulièrement de l'utilité et de l'utilisabilité (Nielsen, 1993; Bastien et Scapin, 2001), mais aussi de l'acceptabilité (Stephanidis, 2009), foisonne également de méthodes, techniques et outils, que l'utilisateur et/ou le système interactif soient disponibles ou non, qu'il existe une expérience d'utilisation ou non, que des approches automatiques ou semi-automatiques soient visés ou non ; dans le cas où l'utilisateur et/ou le système ne sont pas présents (pour des raisons de disponibilité ou parce

que le projet est dans une étape très précoce par exemple), le recours à des modèles s'impose. Là encore le lecteur intéressé trouvera de nombreux documents disponibles (Nielsen, 1993; Baccino *et al.*, 2005; Huart *et al.*, 2008; Ezzedine *et al.*, 2012; Jacko, 2012), etc.).

En lien avec ces travaux en conception et évaluation, un problème récurrent, valable pour tout domaine d'application, est celui de la mise à disposition des recommandations ergonomiques disponibles auprès des équipes projet, et ceci sous différentes formes, aussi bien sous format papier que logiciel. On s'intéresse dans ce chapitre au courant de recherche "*Tools for working with guidelines*" visant l'opérationnalisation de la connaissance dans des outils logiciels d'aide à la conception, à l'évaluation, ou encore à la formation de concepteurs et évaluations, aussi bien experts que novices (Vanderdonckt et Farenc, 2000). Un concept central à ce courant est celui de règle, dite aussi règle ergonomique (traduit par *guideline* ou *ergonomic guideline*) (Vanderdonckt, 1999). Par exemple, selon (Bastien et Scapin, 1993), en termes d'utilisabilité, des recommandations peuvent être associées à différents critères importants liés au guidage, au contrôle du dialogue, à la gestion des erreurs, à la cohérence, la charge de travail, l'adaptabilité, la compatibilité, la signification des codes et des dénominations. On considère que les règles peuvent constituer une source importante pour détecter les problèmes actuels ou potentiels de l'interface utilisateur d'un système interactif afin de l'améliorer, mais aussi dans le but de le concevoir (la conception et l'évaluation étant étroitement liées) (Tran, 2009). Le terme "règle" englobe les recommandations abstraites ou concrètes possibles qui sont utilisées pour la conception (par les concepteurs) et l'évaluation des systèmes interactifs (par les experts en utilisabilité) afin de concevoir des interfaces utilisateurs plus efficaces et conviviales (D. *et al.*, 2000). D'après (Vanderdonckt, 1994), une règle ergonomique constitue un principe de conception et/ou d'évaluation à observer en vue d'obtenir et/ou de garantir une interface utilisateur ergonomique.

Cinq types de recommandations sont souvent distingués : les standards de conception, les articles de recommandation, les guides de recommandation, les guides de style, les algorithmes de conception ergonomique. Les règles peuvent correspondre à des recommandations générales et indépendantes des domaines comme dans (Scapin, 1986; Smith et Mosier, 1986), etc. Elles peuvent aussi être regroupées dans des guides de style propres à un système, un environnement ou une organisation particulière. Actuellement, il existe de nombreuses sources décrivant des règles ergonomiques (Stewart et Travis, 2002) : normes internationales (ISO 9241, ISO/IEC 9126), nationales (HFES, AFNOR, BSI ...), rapports et livres de synthèse entrant dans le détail de critères et recommandations ergonomiques, standards issus d'entreprises, etc. La figure 3 classe ces cinq types de recommandations en fonction de leur niveau d'applicabilité : les standards sont considérés comme les sources de connaissances ergonomiques les plus générales, donc les plus largement applicables, mais aussi requérant le plus d'interprétation en fonction du contexte d'utilisation afin d'être correctement appliquées. De l'autre côté du continuum, les patrons de conception, les règles de conception ne nécessitent presque plus d'interprétation, tant leur application est directe, ce qui les rend plus spécifiques et donc moins applicables en général. Plus une connaissance ergonomique est largement applicable, plus elle requiert un effort d'interprétation ; plus elle est applicable de manière restreinte, moins elle requiert un effort d'interprétation.

La figure 4 répertorie les recommandations en fonction de deux axes : leur besoin d'interprétation et le niveau de précision requis pour une implémentation directe : les algorithmes ergonomiques ne nécessitent aucune interprétation puisque leurs résultats sont

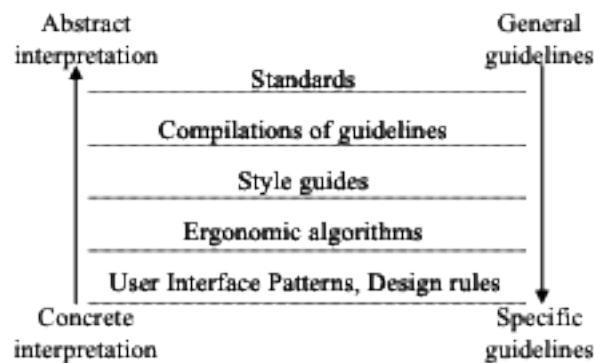


FIGURE 3: Classement des cinq types de recommandations en fonction de leur niveau d'applicabilité.

totalement guidés par les spécifications de l'algorithme concerné, qui les rendent directement implémentables. De l'autre côté du continuum, les principes demandent un haut niveau d'interprétation (ce qui peut poser problème), les rendant donc difficiles à mettre en œuvre de manière directe.

De nombreux problèmes à résoudre, par rapport auxquels l'interaction personne-système et l'intelligence artificielle sont nécessairement ou potentiellement liés, peuvent être mis en évidence :

- La capitalisation des connaissances ergonomiques en conception et évaluation des systèmes interactifs manque de systématisation et requiert des méthodes adaptées à l'évolution rapide des technologies, mais aussi à l'avènement d'approches à base de modèles ; elle pourrait tirer profit du domaine de l'ingénierie des connaissances (voir à ce sujet le chapitre I.20).
- Beaucoup de connaissances ergonomiques sont par nature floues, incomplètes, redondantes, difficiles d'accès pour des non spécialistes, ne tiennent pas suffisamment compte du contexte d'usage (Vanderdonckt, 1999). Un énorme travail de formalisation reste à accomplir dans ce domaine ; celui-ci pourrait s'appuyer sur les travaux les plus récents en représentation des connaissances (cf. le premier volume de cet ouvrage).
- Pour ce qui est de l'exploitation de ces règles ergonomiques dans des outils automatiques ou semi-automatiques, nécessairement à base de connaissance, dédiés à la conception et l'évaluation de la partie interactive des systèmes, la prise en compte des nouvelles architectures et modèles de raisonnement provenant de l'intelligence artificielle serait également à envisager.

11.6 Visualisation et fouille de données

Le traitement et la fouille de données sont aujourd'hui une priorité non seulement du monde de la recherche mais aussi des entreprises, petites ou grandes. Les entreprises possèdent une mine de données sur leurs activités, sur leurs clients. Elles mettent en place des processus de récolte

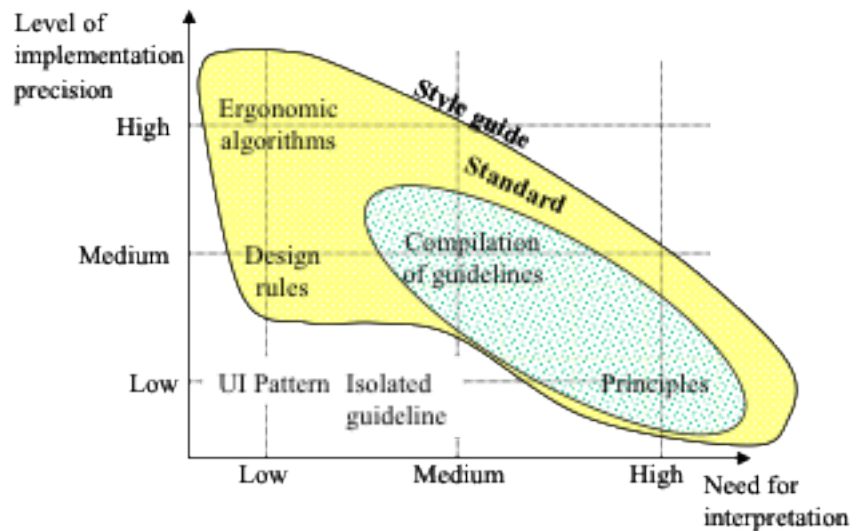


FIGURE 4: Types de recommandations répertoriés sous l'angle de leur besoin d'interprétation et du niveau de précision requis pour leur implémentation directe.

d'information décrivant leurs processus d'affaires. Les activités de veille exigent de collecter et de fouiller toutes les données accessibles leur permettant de se positionner par rapport à leurs concurrents, ou par rapport aux évolutions du contexte socio-économique dans lequel elles évoluent.

Ces données sont aujourd'hui massives – on parle bien de “*big data*”. Elles sont complexes, tout autant que les phénomènes dont elles dérivent, mais aussi souvent parce qu'elles sont non structurées. Parce qu'on ne peut savoir a priori l'information qui s'y trouve et parce que le défi consiste à en tirer des connaissances.

La fouille de données fournit des algorithmes capables de faire émerger des données des motifs structuraux – souvent exprimées sous forme de règles d'association. Classiquement, un supermarché sera intéressé à fouiller le “panier de la ménagère” (via les cartes de fidélité) pour découvrir des profils d'acheteurs et décider de sa stratégie marketing. Un opérateur téléphonique voudra comprendre ce qui distingue le marché adolescent pour mieux le cibler. Si les données sont massives et complexes, les résultats de la fouille le sont souvent tout autant. Il faudra encore trier et classer ces résultats pour espérer arriver à une synthèse utile pour la prise de décision.

L'opération de fouille est une affaire de découverte de motifs structuraux. Le domaine de la visualisation d'information s'appuie au départ sur une observation fondamentale : 40% de nos activités cérébrales sont consacrées au traitement de signaux visuels (Ware, 2000). Le défi qui se pose est donc de proposer à l'utilisateur une cartographie des données qui lui permettent, d'une part, de repérer visuellement les motifs devenus “graphiques”, et d'autre part de pouvoir agir sur la visualisation pour accéder aux données sous-jacentes ou modifier la représentation afin de comprendre la structure qui est exposée. La littérature contient une mine de résultats

décrivant différents modes de représentations, souvent formulées pour un type de données particuliers : données temporelles (Silva et Catarci, 2000) (Daassi *et al.*, 2006), données géospatiales (Andrienko et Andrienko, 2006), réseaux (Herman *et al.*, 2000) (Landesberger *et al.*, 2011) ou données multidimensionnelles (Hoffman et Grinstein, 2002).

La visualisation doit résoudre au départ un problème qui, s'il peut être formulé simplement, s'avère souvent des plus complexes. Outre la nécessité de calculer la position sur l'écran (les coordonnées dans un espace euclidien) des éléments de données, il faut aussi déterminer les bons éléments graphiques (couleurs, formes, saliences, etc.) qui refléteront les propriétés intrinsèques des attributs des données (distribution, corrélation, distorsion des distances ou des similarités, etc.). Le calcul des positions relève le plus souvent de l'optimisation combinatoire alors que l'encodage visuel engage la sémiotique graphique (Bertin, 1998) (Ware, 2000) et sort du champ strictement calculatoire.

La visualisation s'inscrit dans un processus de traitement des données et de l'information. On représente traditionnellement ce processus comme un pipeline où s'enchaînent les étapes de traitement, depuis la prise en main des données et l'analyse (statistique /combinatoire) jusqu'au calcul d'une représentation dans un espace euclidien et à son rendu sur écran (Card *et al.*, 1999) (Chi, 2000) (dos Santos et Brodlie, 2004). En réalité, ce processus se développe de manière non linéaire au travers de boucles d'itérations où émerge la structure, et où se construisent des hypothèses : les premières itérations amènent l'utilisateur à cibler les données qu'il faudra ensuite investiguer plus à fond, d'où émergeront des hypothèses que l'on pourra ensuite tester et démontrer ; la visualisation apportera enfin son aide lorsqu'il s'agira de communiquer les découvertes et motiver la prise de décision. C'est ce que Thomas et Cook ont appelé la "*Sense-Making Loop*" (cf. Figure 5) dans leur ouvrage fondateur du domaine de la visualisation analytique (Thomas et Cook, 2006) et qui fait écho à la mantra de Shneiderman "*Overview first, zoom and filter, then details on demand*" (Shneiderman, 1996).

La complexité des données, leur caractère incertain et changeant impose de placer l'intelligence humaine au cœur du processus de fouille. Si la mantra de Shneiderman l'énonce clairement, l'exposé de Thomas & Cook le pose en fondement d'un champ de recherche qui s'affirme depuis une décennie : la visualisation analytique (Visual Analytics). Plus que l'analyse de données ou le repérage de motifs, il s'agit de faire émerger de la connaissance.

Le pipeline de visualisation, comme le Sense-Making Loop, s'ouvre naturellement sur un modèle plaçant l'utilisateur au centre d'un processus de découverte (van Wijk, 2005). Si le pipeline correspond à une architecture applicative encapsulant le traitement automatisé des données, c'est l'interaction qui permet à l'utilisateur d'associer l'intelligence humaine au processus de fouille. Il devient dès lors critique de pouvoir cerner en quoi une technique de visualisation, qu'il s'agisse d'un mode de représentation ou d'un mode d'interaction et plus souvent de leur bonne conjugaison, est plus "efficace" – plus à même d'aider l'utilisateur dans ses tâches de manipulations interactives des données et de formulation d'hypothèses. La conduite d'expériences contrôlées, familières au monde de l'interaction personne-système, s'est imposée comme mode de validation (Purchase, 2012) (Sedlmair *et al.*, 2012). Or, ce mode de validation convient pour tester l'utilisabilité des techniques de visualisation en ce qu'elles permettent d'effectuer des tâches de bas niveau (des manipulations à fine granularité sur les données) (Amar *et al.*, 2005) (Lee *et al.*, 2006).

Mais le processus de découverte est un processus cognitif de haut niveau. Aucune expérience contrôlée ne saurait démontrer qu'une technique de visualisation (plus souvent un agence-

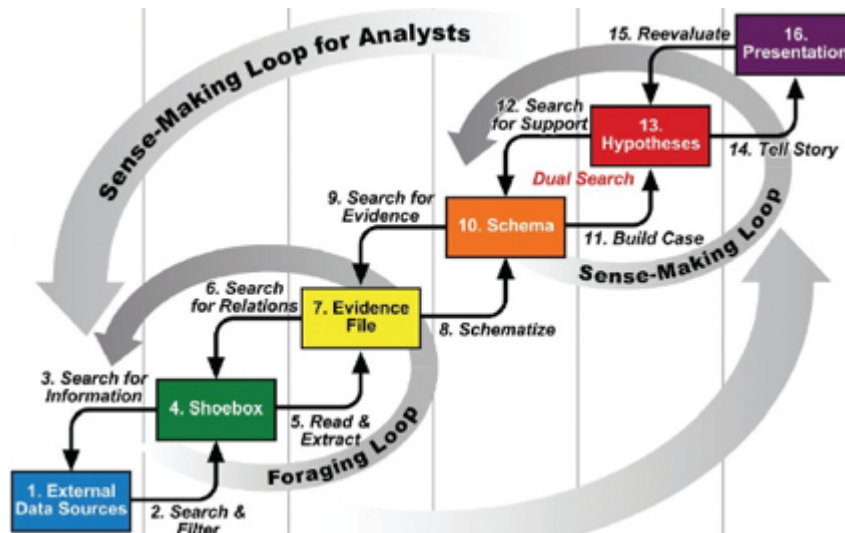


FIGURE 5: La *Sense-Making Loop* décrit le processus itératif au sein duquel s'inscrit la visualisation analytique (Thomas & Cook 2006).

ment de ces techniques) est plus à même de favoriser la découverte de nouvelles connaissances. Une évaluation ici ne se formule pas en mesures psychométriques (temps et précision d'exécution d'une tâche) mais plutôt en principes de conception et en bonnes pratiques d'ingénierie. (Munzner, 2009) a proposé un modèle imbriqué présentant le design d'une visualisation depuis les questions telles qu'elles sont formulées par les experts du domaine (voir aussi (Meyer *et al.*, 2012)). C'est seulement lorsque les motivations sont claires, et exprimées à l'aide de questions ancrées dans le domaine où seront formulées les hypothèses, que l'on doit chercher à cerner les données qui permettront d'y répondre, et le cas échéant les transformations à apporter à ce matériau de l'analyse. Viennent ensuite le choix d'un encodage visuel pertinent et des interactions en phase avec les manipulations envisagées sur les données. Les questions algorithmiques interviennent aussi en dernier essor – et ont leur importance surtout lorsqu'il s'agit de proposer des représentations graphiques qui doivent se plier aux exigences d'une manipulation interactive. La validation d'une visualisation déclinée selon ce modèle peut alors se faire à chacun des niveaux de ce modèle imbriqué. Les algorithmes sont évalués en termes de complexité algorithmique ou jaugés selon des jeux de données de référence (benchmarks). Les choix de représentations et les modes d'interaction peuvent se prêter aux expériences contrôlées. La visualisation (vue comme système d'aide à la décision, par exemple) pourra faire l'objet d'une enquête de terrain auprès d'utilisateurs ciblés de manière à rassembler des témoignages attestant de son utilisabilité sur des cas réels. Enfin, l'adoption du système par une communauté d'utilisateurs reste la preuve la plus tangible d'une bonne conception, à tous les étages.

La visualisation d'information agit comme révélateur des structures exhibées par les techniques de fouille et d'analyse de données. Elle peut aussi être un lieu de synergie avec

l'intelligence artificielle précisément parce qu'elle engage par définition l'intelligence humaine. Et parce qu'il s'agit d'aborder la complexité de phénomènes en taille réelle, en explorant des données au caractère incertain et changeant.

11.7 Conclusion

C'est sans souci d'exhaustivité et en se focalisant sur plusieurs grands domaines de recherche très représentatifs et actuels que ce chapitre a donné un aperçu de la fertilisation croisée entre interaction personne-système et intelligence artificielle.

Les travaux à l'intersection des deux domaines ont démarré il y a maintenant une quarantaine d'années, les premiers systèmes combinant étroitement intelligence et interactivité ayant fait l'objet de premiers développements particulièrement dans le domaine aéronautique, et se poursuivant actuellement dans différents domaines (simulation, web sémantique, e-commerce, réseaux sociaux, systèmes dynamiques complexes, intelligence ambiante ...).

Les interfaces utilisateur dites intelligentes ont tiré profit rapidement de la complémentarité entre l'interaction personne-système et l'IA pour devenir rapidement un domaine de recherche à part entière aux multiples facettes. Parmi les nombreuses approches d'interfaces utilisateur, les agents conversationnels animés affectifs, mis en avant dans ce chapitre, présentent des perspectives particulièrement prometteuses.

La capitalisation, la formalisation et l'exploitation de connaissances ergonomiques pour la conception et l'évaluation des systèmes interactifs ont fait l'objet de nombreux travaux depuis le début des années 80. Ceux-ci se poursuivent de plus belle, les potentialités de fertilisation croisées entre interaction personne-système et IA continuant à être énormes à ce sujet.

Enfin, visualisation et fouille de données, dont les liens étroits ont été passés en revue dans la dernière partie de ce chapitre, sont aussi particulièrement représentatifs des domaines où l'interaction personne-système et l'IA se rejoignent naturellement.

Références

- ABED, M., ANLI, A., KOLSKI, C. et GRISLIN-LE STRUGEON, E. (2011). A generic method for personalizing interactive systems: application to traveler information. *In KOLSKI, C., éditeur : Human-Computer Interactions in Transport*, pages 51–91. ISTE Ltd and John Wiley & Sons Inc.
- ABOWD, G. D., DEY, A. K., BROWN, P. J., DAVIES, N., SMITH, M. et STEGGLES, P. (1999). Towards a better understanding of context and context-awareness. *In Proceedings of the 1st international symposium on Handheld and Ubiquitous Computing*, HUC '99, pages 304–307.
- AMAR, R., EAGAN, J. et TASKO, J. (2005). Low-level components of analytic activity in information visualization. *In IEEE Symposium on information Visualization*, pages 111–117. IEEE Computer Society.
- ANDRIENKO, N. et ANDRIENKO, G. (2006). *Exploratory Analysis of Spatial and Temporal Data - A Systematic Approach*. Springer.
- ASIMOV, I. (2008). *I Robot*. Random House Publishing Group.

- BACCINO, T., BELLINO, C. et COLOMBI, T. (2005). *Mesure de l'utilisabilité des interfaces*. TIC et Sciences Cognitive. Hermes.
- BASTIEN, J. M. C. et SCAPIN, D. L. (1993). Ergonomic criteria for the evaluation of human-computer interfaces. Rapport technique 156, INRIA, Rocquencourt.
- BASTIEN, J. M. C. et SCAPIN, D. L. (2001). Evaluation des systèmes d'information et critères ergonomiques. In KOLSKI, C., éditeur : *Environnement évolués et évaluation de l'IHM, Interaction Homme Machine pour les SI*, volume 2, pages 53–80. Paris : Hermès.
- BEALE, R. et CREED, C. (2009). Affective interaction: How emotional agents affect users. *International Journal of Human-Computer Studies*, 67(9):755–776.
- BEAUDOUIN-LAFON, M. et MACKAY, W. (2003). Prototyping tools and techniques. In JACKO, J. A. et SEARS, A., éditeurs : *The Human Computer Handbook: Fundamentals, Evolving Technologies, and Emerging Applications*, pages 1006–1031. L. Erlbaum Associates Inc., Hillsdale, NJ, USA.
- BEKA BE NGUEMA, M., KOLSKI, C., MALVACHE, N. et WAROUX, D. (2000). Design of a human-error-tolerant interface using fuzzy logic. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 13(3):279–292.
- BELLOT, P. (2011). *Recherche d'information contextuelle, assistée et personnalisée*. Collection recherche d'information et web. Hermes Science Publications / Lavoisier.
- BERNERS-LEE, T., HENDLER, J. et LASSILA, O. (2001). The semantic web. *Scientific American Magazine*.
- BERTIN, J. (1998). *Sémiologie Graphique : Les Diagrammes, Les Réseaux, Les Cartes*. Les ré-impressions. Ecole des Hautes Etudes en Sciences Sociales.
- BOY, G. (1991a). *Intelligent assistant systems*. Academic Press, New York.
- BOY, G. A. (1991b). Indexing hypertext documents in context. In *Proceedings of Hypertext '91*, pages 51–61. ACM Press.
- BOY, G. A. (1992). Semantic correlation in context: Application in document comparison and group knowledge design. In *AAAI Spring Symposium on Cognitive Aspects of Knowledge Acquisition*.
- BOY, G. A. (1998). *Cognitive Function Analysis*. Ablex/Greenwood, Westport, CT, USA.
- BOY, G. A. (2012). *Orchestrating Human-Centered Design*. Springer, U.K.
- BROSSARD, A., ABED, M. et KOLSKI, C. (2011). Taking context into account in conceptual models using a model driven engineering approach. *Information and Software Technology*, 53(12):1349–1369.
- BRUSILOVSKY, P., KOBZA, A. et NEJDL, W., éditeurs (2007). *The Adaptive Web: Methods and Strategies of Web Personalization*. Springer Verlag, Heidelberg, Germany.
- CALVARY, G. et COUTAZ, J. (2007). Métamorphose des IHM et plasticité. *Revue d'Interaction Homme-Machine (RIHM)*, pages 35–60.
- CALVARY, G., COUTAZ, J., THEVENIN, D., LIMBOURG, Q., BOUILLON, L. et VANDERDONCKT, J. (2003). A unifying reference framework for multi-target user interfaces. *Interacting with Computers*, 15(3):289–308.
- CALVARY, G., PRIBEANU, C., SANTUCCI, G. et VANDERDONCKT, J., éditeurs (2008). *Computer-Aided Design of User Interfaces V – Sixth International Conference of Computer-*

- Aided Design of User Interfaces 2006*, Bucharest, Romania. Springer.
- CANAMERO, L. (2003). Designing emotions for activity selection in autonomous agents. In TRAPPL, R., PETTA, P. et PAYR, S., éditeurs : *Emotions in Humans and Artifacts*, pages 115–148. MIT Press.
- CAPLIER, A. (2010). Reconnaissance visuelle des émotions : état des lieux et principaux enjeux. In PELACHAUD, C., éditeur : *Systèmes d'interaction émotionnelle*, pages 141–170. Hermes Lavoisier.
- CARD, S., MACKINLAY, J. et SHNEIDERMAN, B. (1999). *Readings in Information Visualization*. Morgan Kaufmann Publishers, San Francisco.
- CARD, S. K., MORAN, T. P. et NEWELL, A. (1983). *The Psychology of Human-Computer Interaction*. Lawrence Erlbaum Associates, Hillsdale, NJ.
- CASSELL, J. (2000). More than just another pretty face: Embodied conversational interface agents. *Communications of the ACM*, 43:70–78.
- CHI, E. H. (2000). A taxonomy of visualization techniques using the data state reference model. In *IEEE Symposium on Information Visualization*, pages 69–75. IEEE Computer Society.
- CHIGNELL, M. H. et HANCOCK, P. A. (1988). Intelligent interface design. In HELANDER, M., éditeur : *Handbook of Human-Computer Interaction*, pages 969–995. Amsterdam: Elsevier.
- CLAVEL, C. et RICHARD, G. (2010). Reconnaissance acoustique des t'motions. In PELACHAUD, C., éditeur : *Systèmes d'interaction émotionnelle*. Hermes Lavoisier.
- COUTAZ, J. et CALVARY, G. (2007). Hci and software engineering for user interface plasticity. In JACKO, J. A., éditeur : *The Human Computer Handbook: Fundamentals, Evolving Technologies, and Emerging Applications*, pages 1195–1220. CRC Press, Boca Raton, FL.
- COUTAZ, J. et REY, G. (2002). Foundations for a Theory of Contextors. In KOLSKI, C. et VANDERDONCKT, J., éditeurs : *Computer-Aided Design of User Interfaces III – Fourth International Conference of Computer-Aided Design of User Interfaces*, volume 3, pages 13–34. Kluwer Academic.
- D., G., D., A. et C., S. (2000). Integrated support for working with guidelines: the sherlock guideline management system. *Interacting with Computers*, 12(3):281–311.
- DAASSI, C., NIGAY, L. et FAUVET, M.-C. (2006). A taxonomy of temporal data visualization techniques. *Revue Information Interaction Intelligence*, 5(2):41–63.
- de MELO, C. M., CARNEVALE, P., READ, S., ANTOS, D. et GRATCH, J. (2012). Bayesian model of the social effects of emotion in decision-making in multiagent systems. In *Proceedings of the 11th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems - Volume 1*, AAMAS '12, pages 55–62, Richland, SC. International Foundation for Autonomous Agents and Multiagent Systems.
- DEROSIS, F., PELACHAUD, C., POGGI, I., CAROFIGLIO, V. et CAROLIS, B. D. (2003). From Greta's mind to her face: Modelling the dynamics of affective states in a conversational embodied agent. *International Journal of Human-Computer Studies*, 59(1-2):81–118.
- DEY, A. K. (2001). Understanding and using context. *Personal Ubiquitous Comput.*, 5(1):4–7.
- dos SANTOS, S. et BRODLIE, K. (2004). Gaining understanding of multivariate and multidimensional data through visualization. *Computers & Graphics*, 28(3):311–325.
- EDMONDS, E. A. (1981). Adaptive man-computer interfaces. In COOMBS, M. J. et ALTY,

- J. L., éditeurs : *Computing skills and the user interface*, pages 389–426. London: Academic.
- EZZEDINE, H., TRABELSI, A., TRAN, C. et KOLSKI, C. (2012). Critères et méthodes d'évaluation des systèmes interactifs, application à un poste de régulation dans le domaine des transports. In HAMMADI, S. et KSOURI, M., éditeurs : *Ingénierie du transport et des services de mobilité avancés*, pages 213–293. Hermès, Paris.
- FORD, K. M., GLYMOUR, C. et HAYES, P. J. (1997). Cognitive prostheses. *AI Magazine*, 18(3).
- GALLUD, J. A., TESORIERO, R. et PENICHER, V. M. R., éditeurs (2011). *Distributed User Interfaces - Designing Interfaces for the Distributed Ecosystem*. Springer.
- GONZÁLEZ CALLEROS, J., MEIXNER, G., PATERNÈ, F., PULLMANN, J., RAGGETT, D. S. et VANDERDONCKT, J. (2010). Model-based ui xg final report. In CANTERA FONSECA, J., éditeur : *W3C Incubator Group Report*.
- GRATCH, J. et MARSELLA, S. (2004). A domain-independent framework for modeling emotion. *Journal of Cognitive Systems Research*, 5(4):269–306.
- GRUDIN, J. (1994). Computer-supported cooperative work: History and focus. *Computer*, 27(5):19–26.
- HANCOCK, P. A. et CHIGNELL, M. H., éditeurs (1989). *Intelligent interfaces: theory, research and design*. Amsterdam: North-Holland.
- HERMAN, I., MARSHALL, M. S. et MELANCON, G. (2000). Graph visualisation and navigation in information visualisation: A survey. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 6(1):24–43.
- HEWETT, T., BAECKER, R., CARD, S., CAREY, T., GASEN, J., MANTEI, M., PERLMAN, G., STRONG, G. et VERPLANK, W. (1992). *ACM SIGCHI curricula for human-computer interaction*. ACM, New York, NY, USA.
- HÖÖK, K. (2000). Steps to take before intelligent user interfaces become real. *Interacting with computers*, 12:409–426.
- HOFER, G. et RICHMOND, K. (2010). Comparison of hmm and tmdn methods for lip synchronisation. In KOBAYASHI, T., HIROSE, K. et NAKAMURA, S., éditeurs : *INTERSPEECH 2010, 11th Annual Conference of the International Speech Communication Association, Makuhari, Chiba, Japan, September 26-30, 2010*, pages 454–457. ISCA.
- HOFFMAN, P. E. et GRINSTEIN, G. G. (2002). A survey of visualizations for high-dimensional data mining. In FAYYAD, U., GRINSTEIN, G. et WIERSE, A., éditeurs : *Information Visualization in Data Mining and Knowledge Discovery*, pages 47–82. Morgan Kaufmann Publishers.
- HUART, J., KOLSKI, C. et BASTIEN, C. (2008). L'évaluation de documents multimédias, état de l'art. In S., M., éditeur : *Objectiver l'humain ?*, volume 1 de *Qualification, quantification*, pages 211–250. Hermes, Paris.
- HUSSMANN, H., MEIXNER, G. et ZUEHLKE, D., éditeurs (2011). *Model-Driven Development of Advanced User Interfaces*, volume 340 de *Studies in Computational Intelligence*. Springer.
- HUTCHINS, E. (1995). *Cognition in the Wild*. MIT Press, Cambridge, MA.
- IVORY, M. Y. et HEARST, M. A. (2001). The state of the art in automating usability evaluation of user interfaces. *ACM Computing Surveys*, 33(4):470–516.

- JACKO, J. A., éditeur (2012). *The Human Computer Handbook: Fundamentals, Evolving Technologies, and Emerging Applications*. CRC Press, Boca Raton, FL, 3rd édition.
- JACOB, R. J. K., LIMBOURG, Q. et VANDERDONCKT, J., éditeurs (2004). *Computer-Aided Design of User Interfaces IV – Fifth International Conference of Computer-Aided Design of User Interfaces*, Funchal, Portugal. Kluwer.
- JAMBON, F., BRUN, P. et AIT-AMEUR, Y. (2001). Spécification des systèmes interactifs. In KOLSKI, C., éditeur : *Analyse et Conception de l'IHM. Interaction Homme Machine pour les SI*, volume 1, pages 175–206. Paris : Éditions Hermes.
- JAMESON, A. (2007). Adaptive interfaces and agents. In SEARS, A. et JACKO, J. A., éditeurs : *The Human Computer Handbook: Fundamentals, Evolving Technologies, and Emerging Applications*, pages 433–458. CRC Press, Boca Raton, FL.
- JAMESON, A. et GAJOS, K. Z. (2012). Systems that adapt to their users. In JACKO, J. A., éditeur : *The Human Computer Handbook: Fundamentals, Evolving Technologies, and Emerging Applications*, pages 431–456. CRC Press, Boca Raton, FL.
- JAQUES, P. A. et VICCARI, R. M. (2004). A BDI approach to infer student's emotions. In *the Proceedings of the Ibero-American Conference on Artificial Intelligence (IBERAMIA)*, pages 901–911, Puebla, Mexique. Springer-Verlag.
- KOLSKI, C. et LE STRUGEON, E. (1998). A review of intelligent human-machine interfaces in the light of the arch model. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 10(3): 193–231.
- KOLSKI, C., TENDJAOUI, M. et MILLOT, P. (1992). A process method for the design of "intelligent" man-machine interfaces : case study : "the decisional module of imagery". *International Journal of Human Factors in Manufacturing*, 2(2):155–175.
- KOLSKI, C. et VANDERDONCKT, J., éditeurs (2002). *Computer-Aided Design of User Interfaces III – Fourth International Conference of Computer-Aided Design of User Interfaces*, Valenciennes, France. Kluwer.
- KUBICKI, S., LEBRUN, Y., LEPREUX, S., ADAM, E., KOLSKI, C. et MANDIAU, R. (2013). Simulation in contexts involving an interactive table and tangible objects. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 31:116–131.
- LANDESBERGER, T. v., KUIJPER, A., SCHRECK, T., KOHLHAMMER, J., WIJK, J. J. v., FEKETE, J.-D. et FELLNER, D. W. (2011). Visual analysis of large graphs: State-of-the-art and future research challenges. *Computer Graphics Forum*, 30(6):1719–1749.
- LAZARUS, R. S. (1991). *Emotion and adaptation*. Oxford University Press.
- LEE, B., PLAISANT, C., PARR, C. S., FEKETE, J. et HENRY, N. (2006). Task taxonomy for graph visualization. In *AVI Workshop on Beyond Time and Errors: Novel Evaluation Methods For information Visualization BELIV '06*, pages 1–5. ACM.
- LEE, J. et MARSELLA, S. (2009). Learning a model of speaker head nods using gesture corpora. In *Proceedings of The 8th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems - Volume 1*, pages 289–296, Richland, SC. International Foundation for Autonomous Agents and Multiagent Systems.
- LIEBERMAN, H. (1995). Letizia: An agent that assists web browsing. In *Fourteenth International Joint Conference on Artificial Intelligence, IJCAI 95*, pages 924–929.
- LIMBOURG, Q., VANDERDONCKT, J., MICHOTTE, B., BOUILLON, L., FLORINS, M. et TRE-

- VISAN, D. (2004). Usixml: A user interface description language for context-sensitive user interfaces. *In ACM AVI'2004 Workshop "Developing User Interfaces with XML: Advances on User Interface Description Languages*, pages 55–62.
- MANDIAU, R., KOLSKI, C., MILLOT, P. et CHAIB-DRAA, B. (1991). A new approach for the cooperation between human(s) and assistance system(s): a system based on intentional states. *In LIEBOWITZ, J., éditeur : Expert Systems World Congress Proceedings*, volume 3, pages 1672–1679, New-York. Pergamon Press.
- MAYBURY, M. T. (1999). Intelligent user interfaces: an introduction (tutorial notes).
- MEYER, M., SEDLMAIR, M. et MUNZNER, T. (2012). The four-level nested model revisited: Blocks and guidelines. *In Workshop on BEyond time and errors: novel evaluation methods for Information Visualization (BELIV)*.
- MUNZNER, T. (2009). A nested process model for visualization design and validation. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 15:921–928.
- NIELSEN, J. (1993). *Usability Engineering*. Academic Press.
- NIEWIADOMSKI, R. et PELACHAUD, C. (2007). Fuzzy similarity of facial expressions of embodied agents. *In Proceedings of the 7th international conference on Intelligent Virtual Agents*, pages 86–98, Berlin, Heidelberg. Springer-Verlag.
- NORMAN, D. A. (1986). Cognitive engineering. *In NORMAN, D. A. et DRAPER, S. W., éditeurs : User Centered System Design: New Perspectives on Human-Computer Interaction*, pages 31–61. Lawrence Erlbaum Associates, Hillsdale, NJ.
- OCHS, M., NIEWIADOMSKI, R., BRUNET, P. et PELACHAUD, C. (2012a). Smiling virtual agent in social context. *Cognitive Processing*, 13(2):519–532.
- OCHS, M., SADEK, D. et PELACHAUD, C. (2012b). A formal model of emotions for an empathic rational dialog agent. *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, 24(3):410–440.
- PATERNO, F. (1999). *Model-Based Design and Evaluation of Interactive Applications*. Springer-Verlag, London, UK, UK, 1st édition.
- PEINTNER, B., VIAPPANI, P. et YORKE-SMITH, N. (2008). Preferences in interactive systems: Technical challenges and case studies. *AI Magazine*, 29(4):13–24.
- PICARD, R. (1997). *Affective Computing*. MIT Press.
- PURCHASE, H. C. (2012). *Experimental Human-Computer Interaction: A Practical Guide with Visual Examples*. Cambridge University Press.
- REEVES, B. et NASS, C. (1996). *The media equation: how people treat computers, television, and new media like real people and places*. Cambridge University Press.
- ROUSE, W. B. et MORRIS, N. M. (1987). Conceptual design of a human error tolerant interface for complex engineering systems. *Automatica*, 23(2):231–235.
- SALOVEY, P., BEDELL, B., DETWEILER, J. et MAYER, J. (2000). Current directions in emotional intelligence research. *In LEWIS, M. et HAVILAND-JONES, J., éditeurs : Handbook of Emotions*, pages 504–520. Guilford Press.
- SCAPIN, D. L. (1986). Guide ergonomique de conception des interfaces homme-ordinateur. Rapport technique 77, INRIA, Le Chesnay.
- SCHERER, K. (2000). Emotion. *In HEWSTONE, M. et STROEBE, W., éditeurs : Introduction to Social Psychology: A European perspective*, pages 151–191. Oxford Blackwell Publishers.

- SCHNEIDER-HUFSCHMIDT, M., KÜHME, T. et MALINKOWSKI, U., éditeurs (1993). *Adaptive User Interfaces*. North Holland.
- SEDLMAIR, M., MEYER, M. et MUNZNER, T. (2012). Design study methodology: Reflections from the trenches and the stacks. *IEEE Trans. Visualization and Computer Graphics (Proc. InfoVis 2012)*, 18(12):2431–2440.
- SEFFAH, A., VANDERDONCKT, J. et DESMARAIS, M., éditeurs (2009). *Human-Centered Software Engineering*, volume 2 de *Software Engineering Models, Patterns and Architectures for HCI*. Springer, London.
- SHADBOLT, N., HALL, W. et BERNERS-LEE, T. (2006). The semantic web revisited. *IEEE Intelligent Systems*, 21(3):96–101.
- SHNEIDERMAN, B. (1996). The eyes have it: A task by data type taxonomy for information visualization. In *IEEE Conference on Visual Languages (VL'96)*, pages 336–343. IEEE CS Press.
- SILVA, S. F. et CATARCI, T. (2000). Visualization of linear time-oriented data: a survey. In *Proceedings of the First International Conference on Web Information Systems Engineering*, volume 1, pages 310–319.
- SMITH, S. L. et MOSIER, J. N. (1986). Guidelines for designing user interface software. Rapport technique MTR-10090, ESD-TR-86-278, MITRE Corp., Bedford, MA.
- STEPHANIDIS, C. (2009). *The Universal Access Handbook*. CRC Press.
- STEWART, T. et TRAVIS, D. (2002). Guidelines, standards, and style guides. In JACKO, J. A. et SEARS, A., éditeurs : *The Human Computer Handbook: Fundamentals, Evolving Technologies, and Emerging Applications*, pages 991–1005. L. Erlbaum Associates Inc., Hillsdale, NJ, USA.
- SU, X. et KHOSHGOFTAAR, T. M. (2009). A survey of collaborative filtering techniques. *Advances in Artificial Intelligence*, 19:Article ID 421425.
- SZEKELY, P. (1996). Retrospective and challenges for model-based interface development. In *Design, Specification and Verification of Interactive Systems '96*, pages 1–27. Springer-Verlag.
- THEVENIN, D. et COUTAZ, J. (1999). Plasticity of user interfaces: Framework and research agenda. In SASSE, A. et JOHNSON, C., éditeurs : *IFIP TC.13 – Human–Computer Interaction — INTERACT'99*. IOS Press.
- THOMAS, J. J. et COOK, K. A. (2006). *Illuminating the Path: The Research and Development Agenda for Visual Analytics*. IEEE Computer Society.
- TRAN, C. D. (2009). *Vers un environnement générique et configurable pour l'aide à l'évaluation des systèmes interactifs à base d'agents, Application à un Système d'Aide à l'Information voyageurs*. Thèse de doctorat, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis.
- van den BERGH, J. (2006). *High-Level User Interface Models for Model-Driven Design of Context-Sensitive User Interfaces*. Thèse de doctorat, Hasselt University, Belgium.
- van WIJK, J. (2005). The value of visualization. In SILVA, C., GROELLER, E. et RUSHMEIER, H., éditeurs : *IEEE Visualization*, pages 79–86. IEEE Computer Society.
- VANDERDONCKT, J. (1994). *Guide ergonomique des interfaces homme-machine*. Presses Universitaires de Namur, Namur, Facultés universitaires Notre-Dame de la Paix à Namur

- (Belgique).
- VANDERDONCKT, J. (1999). Development milestones towards a tool for working with guidelines. *Interacting With Computers*, 12(2):81–118.
- VANDERDONCKT, J. et COYETTE, A. (2007). Modèles, méthodes et outils de support au prototypage multi-fidélité des interfaces graphiques. *Revue d'Interaction Homme-Machine*, 8(1):91–123.
- VANDERDONCKT, J. et FARENC, C., éditeurs (2000). *Tools for Working With Guidelines TFWWG'2000*, London. Springer.
- VANDERDONCKT, J. et PUERTA, A. R., éditeurs (1999). *Computer-Aided Design of User Interfaces II – Third International Conference of Computer-Aided Design of User Interfaces*, Louvain-la-Neuve, Belgium. Kluwer.
- WARE, C. (2000). *Information Visualization: Perception for Design*. Morgan Kaufmann Publishers.
- WINOGRAD, T. (2001). Architectures for context. *Hum.-Comput. Interact.*, 16(2):401–419.
- WOODSON, W. et CONOVER, D. (1964). *Human Engineering Guide for Equipment Designers*. University of California Press, Berkeley, California.

