

Conception et évaluation des IHM de supervision : éléments méthodologiques

Christophe KOLSKI et Houcine EZZEDINE

LAMIH - UMR CNRS 8530, Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis,
Le Mont Houy - 59313 Valenciennes Cedex, FRANCE

Résumé. Dans cet article sont passés en revue un ensemble d'éléments méthodologiques liés à la conception et à l'évaluation d'interfaces homme-machine. Des modèles de développement éventuellement enrichis sous l'angle des interactions homme-machine sont d'abord positionnés. L'analyse et la modélisation de système technique, ainsi que de tâches humaines sont ensuite mises en avant, en faisant le lien avec l'analyse et la modélisation cognitive de l'utilisateur. Il s'agit ensuite de recenser des méthodes, techniques et outils facilitant la spécification et la conception de système interactif. Des modèles d'architecture des systèmes interactifs sont recensés, de même que des concepts relatifs aux interfaces homme-machine intelligentes. Enfin, l'article s'intéresse aux méthodes et critères d'évaluation sous l'angle de l'ergonomie des logiciels. Dans le cadre de ce numéro spécial, cet article se veut avant tout générique, tout en gardant en vue les interfaces utilisées dans le domaine de la supervision de trafic.

Mots-clés. Système interactif, interface homme-machine, interaction homme-machine, spécification, conception, évaluation, génie logiciel, ergonomie

INTRODUCTION

L'avènement des nouvelles Sciences et Technologies de l'Information et de la Communication (STIC) débouche progressivement sur une prépondérance des systèmes interactifs dans tous les domaines de la société : systèmes multimédia (sites Web, CD-ROM...) en rapport avec des applications ludiques, culturelles ou pédagogiques, systèmes d'information dans les entreprises, environnements de bureautique, systèmes de services grand public, environnements de développement, CAO, Systèmes Interactifs d'Aide à la Décision (SIAD), outils interactifs mis à la disposition des opérateurs humaines dans les salles de contrôle de systèmes industriels complexes, etc. Quel que soit le domaine, la tendance est d'aller vers des systèmes interactifs de plus en plus conviviaux,

intelligents (au sens de l'Intelligence Artificielle), adaptés aux besoins des utilisateurs.

Dans le cadre de ce numéro spécial, c'est plus particulièrement le domaine des systèmes industriels complexes qui nous intéresse, avec une visée d'application à la supervision de trafic.

Suivant le projet, on remarque un ensemble d'éléments à considérer avec attention lors de l'analyse, la conception et l'évaluation des interfaces homme-machine. Ainsi, il s'agit souvent pour les utilisateurs de réaliser des tâches plus ou moins complexes, pouvant conduire à des problèmes difficiles à résoudre, sources d'erreurs humaines possibles [62] ; plusieurs critères doivent souvent être considérés, pouvant d'ailleurs s'avérer éventuellement contradictoires (faut-il plutôt avantager la sécurité, la productivité,

la qualité de service ou encore l'économie ?).

Une typologie des utilisateurs peut dans de nombreux cas être mise en avant, les fonctionnalités du système pouvant s'adresser aussi bien à un utilisateur qu'à une équipe, une organisation humaine ; des situations très variées peuvent être rencontrées par les utilisateurs (opérateurs humains), des situations aussi bien normales qu'anormales débouchant sur des besoins différents [48, 49, 61, 70].

Les interfaces graphiques seront associées éventuellement à des modules d'aide (à la décision, à l'action...) purement algorithmiques ou basés sur des méthodes issues de la Recherche Opérationnelle, de l'Intelligence Artificielle (conseils d'action, prédiction, diagnostic, gestion d'alarmes, recherche d'information...), connectés à des bases de données, etc. ; les contraintes temporelles seront plus ou moins fortes selon le domaine d'application ; il s'agit également de mettre en avant la diversité des supports d'interaction et la nécessaire adaptation à ceux-ci, ouvrant de nouvelles perspectives pour les interactions homme-machine (cf. la notion de « plasticité » au sens de Calvary et ses collègues [16]).

Depuis de nombreuses années a été mis en évidence le besoin en démarches rigoureuses et systématiques pour la conception et l'évaluation des systèmes interactifs. La littérature en Interaction Homme-Machine est extrêmement riche. L'objectif de cet article est donc simplement de mettre en avant, sans souci d'exhaustivité, mais plutôt de représentativité, un ensemble d'éléments méthodologiques. Le lecteur intéressé se réfèrera à différents documents, tels [31, 36, 39, 40, 41].¹

¹ Voir aussi le site de l'Association Francophone d'Interaction Homme-Machine (AFIHM) à l'adresse suivante : www.afihm.org/. Cf. également celui du *Special Interest Group on Human-Computer Interaction* (SIGCHI) de l'ACM (*Association for Computing Machinery*) : www.acm.org/sigchi/.

Cet article débutera par une étude critique globale des principaux modèles et méthodes de développement issus du GL, tout en mettant en avant des modèles enrichis sous l'angle des interactions homme-machine. L'accent sera mis ensuite sur des méthodes d'analyse et de modélisation de système technique, des tâches humaines, ainsi que sur des méthodes contribuant à l'analyse et la modélisation cognitive de l'utilisateur. Il s'agira ensuite de lister des méthodes de spécification et conception des interfaces homme-machine. Des modèles d'architecture des systèmes interactifs seront mis en avant, tout en soulignant l'apparition de concepts d'IHM dites « intelligentes ». Des méthodes et critères d'évaluation des systèmes interactifs seront également recensés.

VERS DES MODELES DE DEVELOPPEMENT ENRICHIS SOUS L'ANGLE DES INTERACTIONS HOMME-MACHINE

Du domaine du Génie Logiciel sont issus des modèles de développement qualifiables de classiques, et fréquemment utilisés depuis parfois plus d'une vingtaine d'années sous leur forme originale, ou selon des variantes, tels que les modèles cascade, en V ou spirale. On souligne généralement des limitations à leur sujet dès lors que le développement d'un système hautement interactif est visé [9] : les interactions homme-machine sont laissées à l'appréciation du concepteur, les utilisateurs ne sont pas concernés explicitement, les tâches humaines n'y sont pas citées... Mis à part de rares exceptions, le constat est d'ailleurs globalement le même pour les méthodes les plus connues (qui se basent elles-mêmes sur des modèles de développement) : qu'elles soient cartésiennes (ex : SADT), systémiques (ex : MERISE, même dans ses versions les plus récentes), orientées objets (UML aujourd'hui, même si elle commence à faire l'objet d'extensions orientées IHM, cf. plus loin) ou formelles (ex : B).

Il est donc nécessaire d'aller vers des modèles enrichis sous l'angle des IHM (idem pour les méthodes) positionnant des notions inexistantes dans les modèles de développement classiques : analyse et modélisation des tâches, de l'utilisateur, évaluation sous l'angle ergonomique, etc. Le lecteur trouvera dans [42] des descriptions de modèles allant dans ce

sens. Un exemple de tel modèle (Nabla) est montré en figure 1. Accordant une grande importance à l'évaluation du système sous l'angle ergonomique, il est constitué d'un double cycle en V, celui de gauche focalisé sur la partie interactive, celui de droite sur la partie applicative (pour plus de détail, lire [42]).

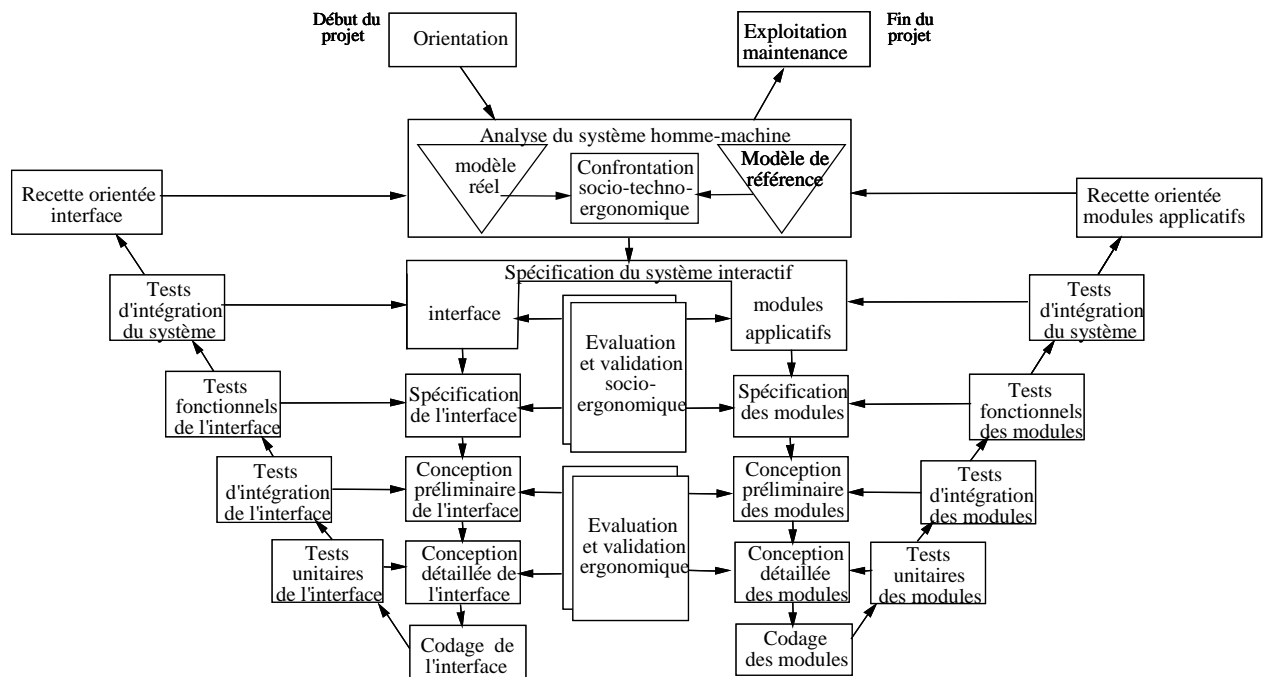


Figure 1. Exemple de modèle enrichi sous l'angle des interactions homme-machine

ANALYSE ET MODELISATION DU SYSTEME

Dans tout projet, il s'agit le plus souvent d'analyser et de modéliser finement le système existant, sa problématique, ses contraintes et caractéristiques selon différentes dimensions (structurelles, fonctionnelles, etc.) avant d'envisager toute solution, puis de la spécifier. En terme d'analyse et de modélisation, le domaine est très riche, de nombreuses techniques et méthodes étant disponibles [25].

On distingue généralement à ce sujet celles destinées à l'analyse du système en fonctionnement normal et à sa description (actigrammes et datagrammes de SADT, diagrammes de flots de données de SA ou

SA_RT, Graphes de fluence, modèles préconisés dans MERISE, modèles d'UML pour l'analyse orientée objets, réseaux de Petri...). Dans les systèmes industriels complexes, afin de compléter (complémenter) l'utilisation de celles-ci, on trouve d'autres techniques et méthodes plus spécifiquement destinées à l'analyse du système en fonctionnement anormal : l'AMDEC (Analyse des Modes de Défaillances, de leurs Effets et de leur Criticité), les arbres de défaillances, les Réseaux de Petri (RdP) ici encore, etc.

A titre d'exemple, la figure 2 montre un extrait d'analyse et modélisation de système par SADT/RdP lors d'un projet avec la SNCF visant la conception et

l'évaluation de système interactif en salle de régulation de trafic ferroviaire [3]. La plupart de ces techniques et méthodes utilisables peuvent s'avérer très utiles pour les applications de supervision de trafic. Elles permettent en particulier le

recensement des différentes situations normales et anormales pour lesquelles des tâches seront effectuées par les utilisateurs de l'IHM et/ou le(s) calculateur(s).

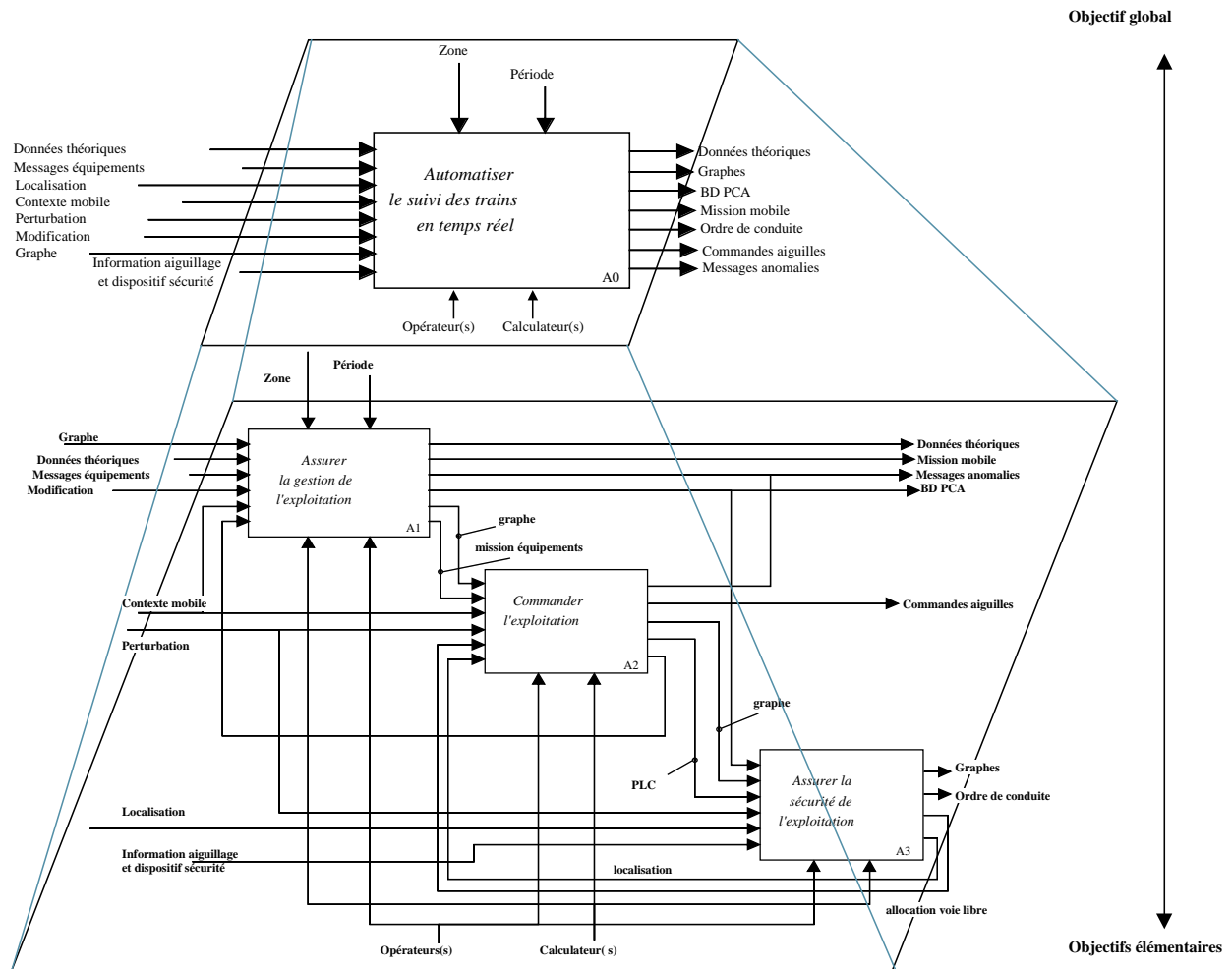


Figure 2. Extrait d'une modélisation de système préalable à la spécification du système interactif

ANALYSE ET MODELISATION DES TACHES HUMAINES

L'analyse et la modélisation des tâches humaines font l'objet de recherches actives depuis une vingtaine d'années (en sciences cognitives, informatique, automatique humaine...) [21, 64].

Celles-ci débouchent actuellement sur des méthodes utilisables par les équipes de développement, et qui ont d'ailleurs fait l'objet de validations dans des situations

industrielles complexes. Cette analyse doit être vue avant tout en tant que travail d'équipe, et suscite les démarches participatives. Elle contribue à faire ressortir de manière fine les objectifs, stratégies, besoins des utilisateurs impliqués dans les différentes situations normales et anormales, apportant ainsi des informations précieuses pour la spécification des systèmes interactifs et des outils d'aide à mettre à leur disposition.

De nombreuses méthodes sont donc disponibles, la plupart utilisables pour les applications de supervision de trafic. Citons à titre d'exemple : MAD et MAD* [27, 63], Diane et Diane+ [9, 72], SADT/Petri [1, 2], Tood [71], CTT [57]. L'analyse et la modélisation des tâches humaines sont en principe indissociables d'une identification des caractéristiques, ressources et limites cognitives de l'utilisateur (opérateurs humains), qu'il s'agit donc d'analyser et de modéliser. A titre d'exemple, la figure 3 montre un court extrait d'une modélisation fine par réseaux de Petri de la dynamique d'une sous-tâche dans un contexte de régulation de trafic ferroviaire dans un but de spécification d'IHM.

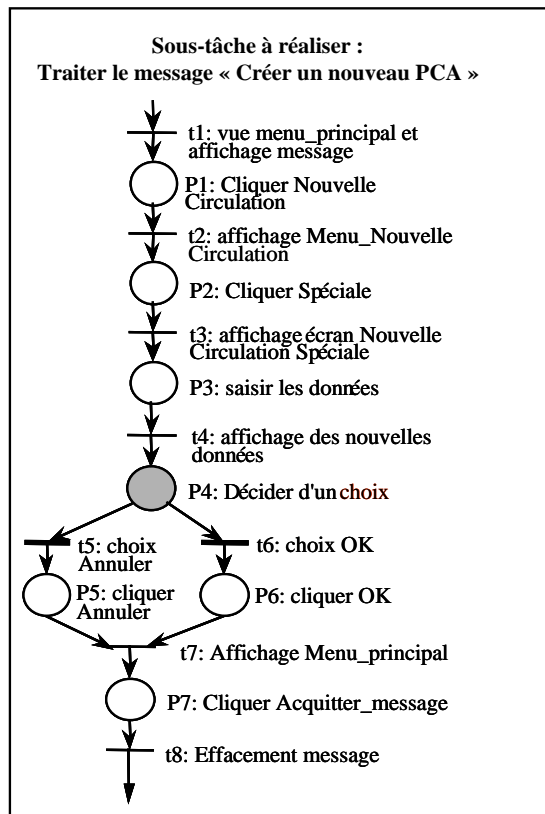


Figure 3. Extrait d'une modélisation de la dynamique d'une sous-tâche

ANALYSE ET MODELISATION COGNITIVE DE L'UTILISATEUR

De nombreuses données en rapport direct avec l'utilisateur doivent être recueillies et

mis en rapport avec l'utilisation potentielle des IHM et des outils d'aide : classification par fonction (ou rôle), typologie par rapport à chaque classe de tâche (novice, expérimenté, expert, occasionnel), niveau de formation, connaissances, expérience par rapport aux tâches à effectuer et aux outils informatiques, etc. [6, 67].

Pour chaque classe de situation (normale ou anormale), il s'agit d'identifier les objectifs, critères de décision et d'intervention considérés en priorité, les stratégies, etc. Dans un cas de système industriel complexe, une analyse fine passe nécessairement par l'intervention d'un spécialiste des facteurs humains. Ce travail débouche en particulier sur la construction d'une banque de données qui doivent être considérées avec attention lors de la spécification et de l'évaluation du système interactif, celui-ci devant être adapté au modèle de l'utilisateur.

Dans cette étape, il faut noter qu'il est possible de s'appuyer sur les tentatives de modélisation humaine, issues des sciences cognitives, voir par exemple la Théorie de l'Action de Norman [53], la modélisation de la démarche de résolution d'un problème par Rasmussen [61], ce même modèle révisé par Hoc et Amalberti [32], les études sur les erreurs humaines [62], etc. Ces sources s'avèrent extrêmement utiles pour les ingénieurs et leur facilitent le plus souvent la compréhension des enjeux liés à de bonnes interactions homme-machine vis-à-vis des aspects de performance, production, économie ou sécurité par exemple.

Il faut aussi noter des tentatives de plus en plus fructueuses pour aller vers des modèles informatisés (ou informatisables) d'utilisateurs. Citons à ce sujet sans souci d'exhaustivité COSIMO (COgnitive SIMulation MOdel [14]) qui vise la modélisation des différents types de comportement humains identifiés par Rasmussen [61] dans un contexte de contrôle de procédé ; ACT* (Adaptive Control of Thought ; [7]) qui correspond à

une architecture cognitive prenant la forme d'un modèle IA (à base de règles) ; ICS (Interacting Cognitive Subsystems) [47]) qui propose une décomposition d'une architecture cognitive en différents sous-systèmes.

De tels modèles peuvent s'avérer utiles pour des aides intelligentes dans les situations complexes. Ils semblent donc à ce sujet ouvrir de nouvelles perspectives vis-à-vis de nouveaux outils destinés à la supervision de trafic.

SPECIFICATION ET CONCEPTION DU SYSTEME INTERACTIF

A partir de l'analyse et de la modélisation des tâches humaines et des différents utilisateurs, les besoins informationnels et les besoins en outils d'aide ont été définis.

Il s'agit alors de spécifier puis concevoir le nombre d'écrans à utiliser, certains écrans pouvant être dédiés à des tâches ou des informations particulières (ex : alarmes), la structure des ensembles d'informations et fonctionnalités à mettre à la disposition des utilisateurs (arborescence, réseau de pages-écrans...), les modalités de dialogue homme-machine, les modalités d'enchaînement des vues (pas d'enchaînement, par numéro, code...), les modes de présentation des informations, d'activation des différents outils d'aide (automatique, à la demande...), les attributs graphiques et règles de comportement des objets de l'IHM, etc.

Pour cela, de nombreuses techniques et méthodes sont disponibles. Il est possible dans un premier temps de dessiner/maquetter sur papier les vues envisagées, ou d'utiliser des éditeurs d'IHM, éventuellement hypermédias (pour une description statique, candidate à des évaluations précoces avec les utilisateurs). La modélisation de la dynamique des interactions homme-machine peut être réalisée à partir de réseau de Pétri, d'ICO (Interactive Cooperative Objects ; [54]), de diagrammes d'états évolués (figure 4), etc.

Notons la contribution potentielle de méthodes de spécification formelle provenant du Génie Logiciel (cf. par exemple [4] exploitant la méthode B), même si des recherches doivent encore être menées dans ce domaine pour faciliter leur exploitation dans des projets de conception de systèmes interactifs.

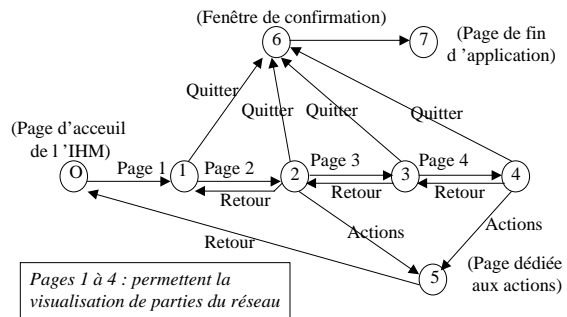


Figure 4. Exemple de modélisation d'enchaînement de pages-écrans par diagramme d'états (facilitant son évaluation avec les utilisateurs selon une démarche participative)

La méthode UML fait aussi l'objet d'extensions sous l'angle des Interactions Homme-Machine qu'il s'agit de suivre avec attention : UMLi [20], Wisdom [54]... En parallèle, on assiste à la proposition de langages prometteurs de description de systèmes interactifs basés sur XML : voir UIML (User Interface Markup Language, [5]), XUL (XML-based User Interface, [55]) ou XIML (eXtensible Interface Markup Language, [60]).

Une tendance actuelle très intéressante vise aussi à aller vers des approches dites de développement à base de modèles [69], dans lesquelles le travail de l'équipe de développement passe par la description de modèles (du domaine, de la tâche, de l'utilisateur...) pour s'orienter progressivement vers la génération semi-automatique du système interactif. Une architecture d'atelier supportant une telle approche est visible en figure 5. Une synthèse d'approches de ce type (MOBI-D, TADEUS, TRIDENT, TOOD...) est disponible dans [71].

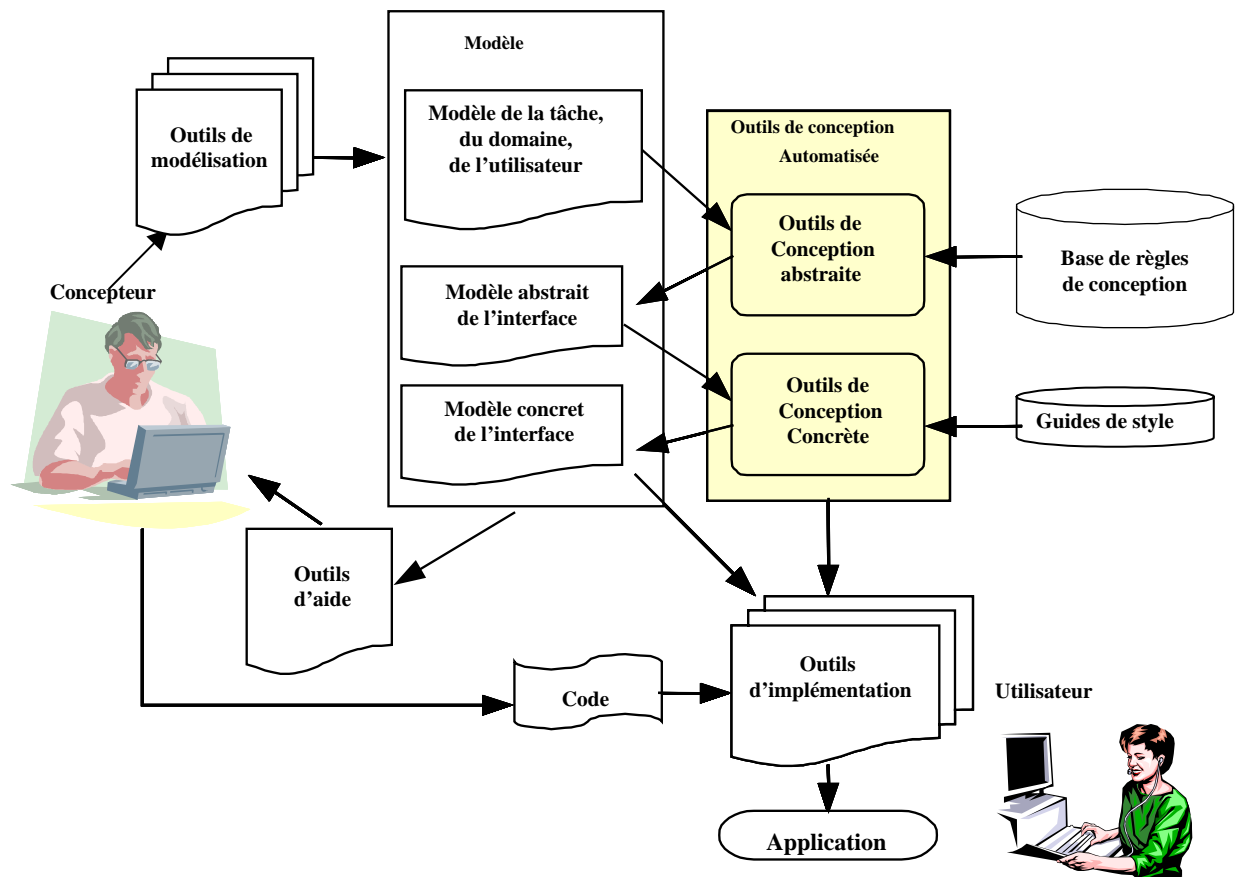


Figure 5. Architecture d'un atelier de développement à base de modèles selon [69]

Quelle que soit la méthode choisie, l'apport de recommandations ergonomiques livresques pourra s'avérer précieuse aux équipes projet ; elles complèteront utilement celles des spécialistes des facteurs humains qui interviendront.

A ce sujet, il existe de nombreux guides dans la littérature spécialisée (cf. [74, 75]), dont certains sont spécifiques d'ailleurs au contrôle de procédé. Le lecteur se rapprochera également d'organismes de normalisation (AFNOR, ISO...), de nombreux guides et recommandations étant disponibles [15, 26, 33]. Des guides de style, accompagnant généralement les boîtes à outils graphiques et environnements de développement du marché (dédiées mondes MS-Windows, Macintosh, UNIX...) pourront également être mis à la disposition des équipes.

Concernant la spécification des modes de représentation pour les différents

composants de l'IHM, il existe une multitude de possibilités graphiques (2D ou 3D), textuelles, numériques, par tableau, etc., et ceci afin de faciliter la perception, la prise de décision et l'action. Il est donc important de ne pas oublier l'existence d'ouvrages ou de revues dédiées (visualisation graphique, simulation, analyse des données, supervision...) qui apporteront des idées nouvelles aux équipes projet. On notera aussi l'existence de recherches autour de nouvelles méthodes d'affichage en rapport avec le concept d'IHM dite écologique ; ces recherches visent à concevoir des interfaces homme-machine qui tirent parti des ressources les plus puissantes que les hommes possèdent pour affronter des situations complexes (voir à ce sujet les travaux de J. Rasmussen, K. Vicente ou N. Moray) [76].

MODELES D'ARCHITECTURE DES SYSTEMES INTERACTIFS, VERS DES CONCEPTS D'IHM INTELLIGENTES

La définition de l'architecture du système interactif constitue un domaine de recherche à part entière [17, 19] et plusieurs modèles d'architecture sont proposés dans la littérature. Parmi les modèles dits centralisés, les plus connus

sont le modèle de Seeheim [59] et Arch [10] (figure 6), ayant fait l'objet de différentes variantes. On trouve également des modèles qualifiés de répartis, tels MVC (cf. le langage Smalltalk), PAC [17] ou PAC-Amodeus [52]. Notons que les recherches visent actuellement à peaufiner ou adapter de telles modèles pour des contextes d'interaction multimodale ou de travail coopératif.

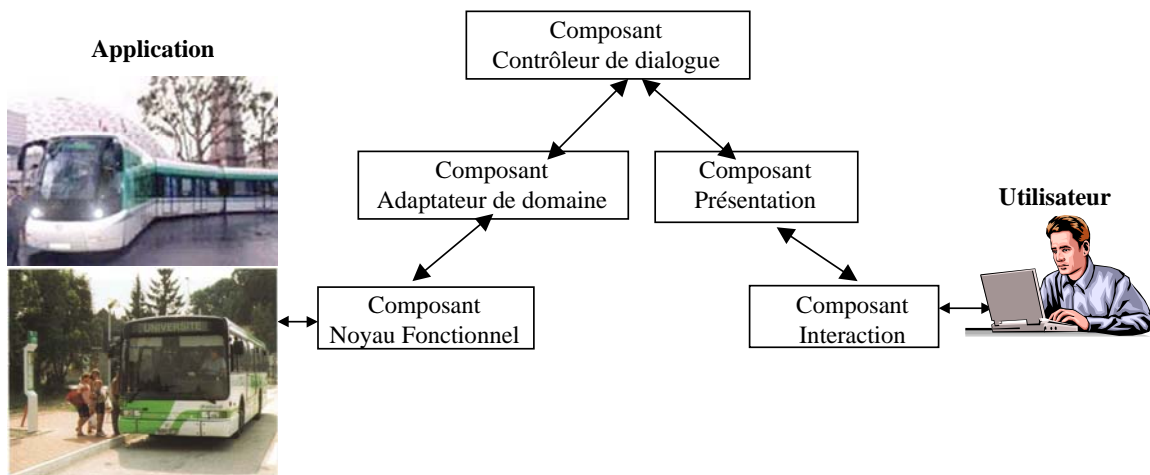


Figure 6. Architecture d'un système interactif selon le modèle ARCH

Depuis la fin des années 80, on assiste en parallèle à la proposition, la mise en œuvre et le test de différents principes d'interaction homme-machine dites "intelligentes" [13, 23, 34, 38, 43, 44], dont la complexité de mise en œuvre varie en fonction du degré « d'intelligence » (figure 7).

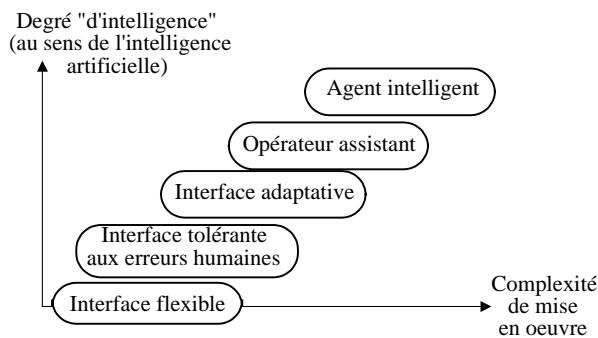


Figure 7. Types d'IHM intelligentes [43]

Ainsi il s'agit d'aller vers des systèmes de plus en plus intelligents, adaptatifs, raisonnant en parallèle à l'utilisateur afin d'anticiper sur ses besoins, en cohérence avec les spécificités et impératifs de l'application. Dans certains cas, le système interactif peut être composé d'agents intelligents au service des utilisateurs [29 ; 37, 46] ; les utilisateurs pouvant être de différents types, il s'agit alors de leur apporter les informations les plus personnalisées possibles, ce qui correspond aussi à un courant de recherche très actuel, particulièrement dans le contexte des transports [45, 58, 73].

De manière générale, toutes ces recherches sont à considérer avec beaucoup d'attention vis-à-vis de la problématique liée à la supervision de réseau. Le lecteur se référera aux auteurs cités pour de plus amples détails sur ces nouvelles approches.

METHODES ET CRITERES D'EVALUATION DES SYSTEMES INTERACTIFS

L'évaluation des systèmes interactifs sous l'angle de leur ergonomie d'utilisation est un domaine à part entière. Ainsi, de nombreuses méthodes d'évaluation sont opérationnelles et déjà largement utilisées dans certaines entreprises ; il est ainsi possible de faire appel par exemple à des consultants, des cabinets spécialisés en évaluation ou des laboratoires de recherche. L'évaluation est aussi depuis plus d'une trentaine d'années un domaine de recherche à part entière au niveau international, des méthodes aussi bien automatiques qu'empiriques apparaissant progressivement, suivant les besoins et les spécificités inhérentes à l'évolution des sciences et technologies de l'information et de la communication.

L'évaluation consiste à vérifier et valider le système interactif, quel que soit le domaine

d'application (supervision, bureautique, systèmes d'information, etc.). Si la version du système répond positivement aux critères mis en avant (performances, utilisabilité, utilité, etc.), celui-ci est accepté et donc validé ; dans le cas contraire, il doit faire l'objet d'aménagements en vue d'une nouvelle évaluation. Ce cycle peut être itéré autant de fois que nécessaire (dans les limites budgétaires allouées à cette phase, qui peuvent s'avérer très insuffisantes...) pour atteindre la satisfaction des exigences définies au départ (lors des spécifications issues de la définition des besoins) permettant à un utilisateur ou groupe d'utilisateurs de réaliser sa tâche au moyen du système interactif qui lui est proposé. Selon Senach [65], toute évaluation consiste à comparer un modèle de l'objet évalué à un modèle de référence permettant d'établir des conclusions, figure 8.

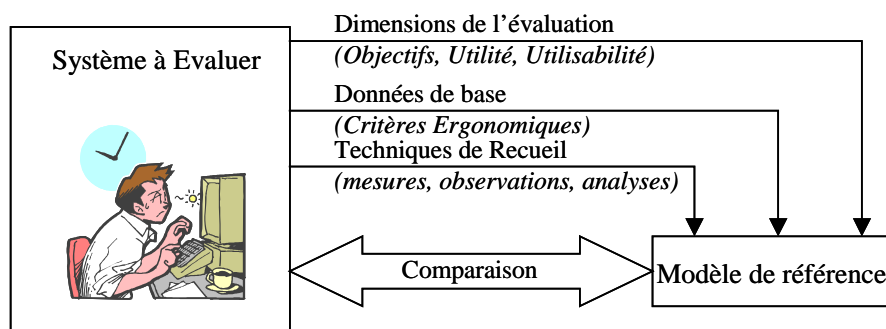


Figure 8. Principe de base de l'évaluation (selon [65])

On ne peut aborder l'évaluation des IHM sans aborder les concepts d'utilisabilité et d'utilité [12, 50, 66]. *L'utilisabilité* rend compte de la qualité de l'interaction Homme-Machine en termes de facilité d'apprentissage et d'utilisation, ainsi que de qualité de la documentation. *L'utilité* détermine si l'IHM permet à l'utilisateur d'atteindre ses objectifs de travail. Elle correspond aux capacités fonctionnelles, aux performances et à la qualité de

l'assistance technique fournie à l'utilisateur par le système [28, 50].

Les méthodes d'évaluation des systèmes interactifs actuellement disponibles sont nombreuses et variées (observations, oculométrie, interviews, questionnaires, tests utilisateurs, méthodes d'inspection, systèmes automatiques à base de connaissances, etc.) [8, 11, 12, 30, 35, 65]. Toutes présentent des avantages et des inconvénients et aucune d'elles ne peut

prétendre à une évaluation exhaustive du système.

Plusieurs classifications des méthodes et techniques d'évaluation existent dans la littérature, elles peuvent être classées par approche [65] : approches analytiques et approches empiriques. L'approche analytique consiste à comparer l'interface à un modèle de référence en estimant plusieurs critères ergonomiques. L'approche empirique est fondée sur la mesure des performances des opérateurs lors d'expérimentations.

D'autres distinctions sont faites entre les approches dites prédictives et des approches dites expérimentales, c'est le cas par exemple de la classification de [51]. L'approche prédictive s'effectue sur une représentation théorique du système et ne nécessite ni système ni utilisateur. Au contraire l'approche expérimentale repose sur un système réel (maquette, prototype, etc.). D'autres méthodes d'évaluation sont basées sur l'utilisateur, la théorie ou alors sur une expertise [68]. Whitefield et al. [77] proposent des classifier les méthodes d'évaluation en fonction de la présence ou non de l'utilisateur d'une part et du système interactif à évaluer d'autre part. Coutaz et Balbo [18] classifient les techniques en fonction de plusieurs paramètres, tel que leur degré d'automatisation, la prise en compte de l'utilisateur, ou encore le savoir utilisé pour l'évaluation. Enfin Bastien et Scapin [12] séparent les approches d'évaluation selon trois éléments centraux de l'interaction homme-machine, à savoir : l'utilisateur, la tâche et le système.

Pour résumer, lorsque l'IHM à évaluer existe, des méthodes d'analyse de données comportementales recueillies au moyen d'observations ou des mesures, sur le terrain ou en laboratoire, sont préconisées. Ces méthodes consistent à réaliser des tests d'utilité et d'utilisabilité avec les utilisateurs finaux ou des sujets sélectionnés pour l'expérience. A titre d'exemple, la figure 9 montre des prises d'information visuelles sur un écran obtenues à l'aide d'un oculomètre [22] lors

de tâches effectuées par un régulateur de réseau ferroviaire (la détermination de lieux des fixations en termes d'objets graphiques est obtenue en superposant les fixations du regard sur l'image projetée à l'écran du poste de travail à un instant donné afin de déterminer les zones consultées et les objets graphiques utilisés dans le cadre de chaque tâche) : dans ce cas d'évaluation, l'oculomètre vient en complément d'autres méthodes (interviews, questionnaires...) [24].

Si le système interactif n'existe pas encore, des évaluations précoces sont également possibles, par exemple à partir de premières maquettes ou en essayant de prédire à partir d'une modélisation a priori des tâches humaines les difficultés que pourraient rencontrer les utilisateurs. L'évaluation peut donc en fait être réalisée aussi bien en amont qu'en aval de la réalisation effective du système interactif.



Figure 9. Extrait de résultat d'une évaluation exploitant un oculomètre

Par manque de place, il n'est pas possible de détailler dans cet article les critères habituellement utilisés en évaluation (cf. à ce sujet [11, 12, 50]) et les dizaines de méthodes et techniques d'évaluation disponibles. Ce numéro spécial ayant pour visée d'application la supervision de trafic, on peut signaler que le lecteur intéressé trouvera dans [39] une synthèse sur les principales méthodes d'évaluation,

replacée dans le contexte des systèmes industriels complexes.

CONCLUSION

Le domaine parcouru très sommairement dans cet article est très riche et diversifié en méthodes, modèles, techniques, connaissances, critères et architectures. Il est de plus en constante évolution, liée en partie aux progrès réalisés dans les Sciences et Technologies de l'Information et de la Communication

L'idéal serait de les enseigner systématiquement dans les formations de concepteurs (aussi bien sous l'angle des sciences de l'ingénieur que des sciences cognitives).

Pour la plupart, elles nous paraissent utilisables ou adaptables pour la conception et l'évaluation de systèmes interactifs destinés à la supervision de trafic.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient la région Nord-Pas de Calais et le FEDER (Projets TACT NIPO et SART) pour le support apporté dans l'étude de certaines notions présentées dans cet article.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Abed M. *Contribution à la modélisation de la tâche par outils de spécification exploitant les mouvements oculaires : application à la conception et l'évaluation des interfaces homme-machine*. Thèse de doctorat, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, Septembre 1990.
- [2] Abed M. *Méthodes et modèles formels et semi-formels pour la conception et l'évaluation des systèmes homme-machine*. Habilitation à diriger des Recherches, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, Mai 2001.
- [3] Abed M., Ezzedine H. Vers une démarche intégrée de conception-évaluation des systèmes Homme-Machine. *Journal of Decision Systems*, Vol. 7, pp. 147-175, 1998.
- [4] Aït-Ameur Y., Girard P. et Jambon F. Using the B formal approach for incremental specification design of interactive systems. In *Engineering for Human-Computer Interaction*, Chatty S. et Dewan P. (Eds.), Chapman & Hall, p. 91-108, 1998.
- [5] Ali M.F., Pérez-Quiñones M.A., Abrams M., Shell E. Building Multi-Platform User Interfaces with UIML. In C. Kolski, J. Vanderdonck (Eds.). *Computer-Aided Design of User Interfaces III*, Valenciennes, France, pp. 381-388. Dordrecht : Kluwer Academic Publishers, 2002.
- [6] Amalberti R., De Montmollin M., Theureau J. (Eds.). *Modèles en analyse du Travail*. Liège : Mardaga, 1991.
- [7] Anderson J.R. *Rules of the mind*. Hillsdale, NJ : Lawrence Erlbaum, 1993.
- [8] Balbo S. *Evaluation ergonomique des interfaces utilisateur : un pas vers l'automatisation*. Thèse de Doctorat en Informatique, Université Joseph Fourier, Grenoble I, Septembre 1994.
- [9] Barthet M.F. *Logiciels interactifs et ergonomie. Modèle et méthodes de conception*. Dunod informatique Paris, 1988.
- [10] Bass L. Little R., Pellegrino R., Reed S., Seacord S., Sheppard S., Szesur M. The Arch model : Seeheim revisited. *Proceedings of User Interface Developers' Workshop*, Seeheim, April, 1991.
- [11] Bastien C. *Les critères ergonomiques : un pas vers une aide méthodologique à l'évaluation de systèmes interactifs*. Thèse de doctorat en Ergonomie cognitive, Université René Descartes (Paris V), décembre 1996.
- [12] Bastien C., Scapin D. Évaluation des systèmes d'information et Critères Ergonomiques. In Kolski C. (dir.), *Environnements évolués et évaluation de l'IHM, Interaction homme-machine pour les SI 2*, Hermes, Paris, p. 53-80, 2001.
- [13] Boy, G. Operator assistant systems. In *Cognitive engineering in complex dynamic worlds*, E. Hollnagel, G. Mancini, D.D. Woods (Eds.), Academic Press, 1988.
- [14] Cacciabue P.C., Mancini G., Bersini U. A model of operator behaviour for man-machine system simulation. *Automatica*, 26 (6), pp. 1025-1034, 1990.

- [15] Cakir A. International Ergonomic HCI standards. In Helander M., Landauer T.K. et Prabhu P. (Eds.), *Handbook of Human-Computer Interaction*. Elsevier Science B.V., pp. 407-420, 1997.
- [16] Calvary G., Coutaz J., Thévenin D. Supporting context changes for plastic user interfaces: a process and a mechanism. In Blanford A., Vanderdonck J., Gray P. (Eds.), *Proc. of HCI-IHM 2001*, Springer-Verlag, London, pp. 349-363, 2001.
- [17] Coutaz J. *Interfaces homme-ordinateur : conception et réalisation*. Bordas, Paris, 1990.
- [18] Coutaz J., Balbo S. Évaluation des interfaces utilisateur, taxonomie et recommandations. *Actes des journées IHM'94*, pp. 211-218, Lille, 8-9 décembre 1994.
- [19] Coutaz J., Nigay L. Architecture logicielle conceptuelle des systèmes interactifs. In Kolski C. (Ed.), *Analyse et conception de l'IHM*, Hermes, Paris, pp. 207-246, 2001.
- [20] Da Silva P.P., Paton N.W. UMLi: the Unified Modelling Language for interactive applications. *Proceedings 3rd International Conference on the Unified Modeling Language UML'2000*, LNCS, vol. 1938, Springer-Verlag, Berlin, pp. 117-132, 2000.
- [21] Diaper D., Stanton N. (Eds.). *The handbook of task analysis for human-computer interaction*. Lawrence Erlbaum Associates, 2003.
- [22] Duchowski A.T., *Eye tracking methodology: theory and practice*, Springer, 2003.
- [23] Edmonds E.A. Adaptive Man-Computer Interfaces. In M.J. Coombs and J.L. Alty (Eds.), *Computing skills and the user interface*, London, Academic press, 1981.
- [24] Ezzedine H., Abed M. Une méthode d'évaluation d'Interface Homme-Machine de supervision d'un procédé industriel. *Journal Européen des Systèmes Automatisés, JESA* vol. 31, n°7, pp. 1087-1110, 1997.
- [25] Fadier E. Fiabilité humaine : méthodes d'analyse et domaines d'application. In J. Leplat et G. De Terssac (Eds.), *Les Facteurs humains de la fiabilité dans les systèmes complexes*, Edition Octarés, Marseille, 1990.
- [26] Fenouillère P. La normalisation, facteur de promotion de l'ergonomie des logiciels dans les entreprises. *Actes de la conférence ERGO-IA'2002*, Biarritz, 8-10 octobre 2002.
- [27] Gamboa Rodríguez F. *Spécification et implémentation d'ALACIE : Atelier Logiciel d'Aide à la Conception d'Interfaces Ergonomiques*. Thèse de Doctorat, Paris XI, Octobre, 1998.
- [28] Grislin M. *Définition d'un cadre pour l'évaluation a priori des interfaces homme-machine dans les systèmes industriels de supervision*. Thèse de Doctorat, LAMIH, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, 1995.
- [29] Grislin-Le Strugeon E., Adam E., Kolski C. Agents intelligents en interaction Homme-Machine dans les Systèmes d'information. Chapitre 7, dans *Environnements évolué et évaluation de l'I.H.M., Interaction Homme-Machine pour les S.I. 2*, C. Kolski (Ed.), Editions Hermes, Paris, pp. 209-248, 2001.
- [30] Grislin M., Kolski, C. Evaluation des interfaces homme-machine lors du développement de système interactif. *Technique et Science Informatiques (TSI)*, 15 (3), mars 1996, p. 265-296.
- [31] Helander M., Landauer T.K. et Prabhu P. (Eds.). *Handbook of Human-Computer Interaction*. Elsevier Science B.V., 1997.
- [32] Hoc J.M., Amalberti R. Diagnosis: some theoretical questions raised by applied research. *Current Psychology of Cognition*, 14 (1), pp. 73-101, 1995.
- [33] Holmstroem C.O. An international standard on control center ergonomics under development. In Vanderdonck J., Farenc C. (Eds.), *Tools for working with guidelines, TFWWG'2000*, Springer, London, 2000, pp. 139-145.
- [34] Höök K. (2000). Steps to take before intelligent user interfaces become real. *Interacting with computers*, pp. 409-426, 12, 2000.
- [35] Huart J. *Mieux concevoir pour mieux communiquer à l'ère des nouveaux médias, Vers des méthodes de conduite de projets et d'évaluation qualité de documents multimédias*. Thèse de doctorat en Sciences de l'Information et de la Communication,

- Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, Novembre 2000.
- [36] Jacko J.A., Sears A. (Eds.). *The human-computer interaction handbook: fundamentals, evolving technologies and emerging applications (human factors and ergonomics)*. Lawrence Erlbaum Associates, 2002.
- [37] Keeble R.J, Macredie R.D. Assistant Agents For The World Wide Web Intelligent interface design challenges. *Interacting with computers*, Vol. 12 No. 4, pp. 357-381, 2000.
- [38] Klusch M. Information agent technology for the internet: a survey. *Data and Knowledge Engineering*, 36 (3), pp. 337-372, 2001.
- [39] Kolski C. *Interfaces homme-machine, application aux systèmes industriels complexes* (2ème édition). Editions Hermes, Paris, 1997.
- [40] Kolski C. Ingénierie des systèmes homme-machine. Chapitre dans *Collection Techniques de l'Ingénieur, traité Contrôle et Mesures*, Techniques de l'Ingénieur, Paris, 1998.
- [41] Kolski C. (Ed.). *Analyse et conception de l'IHM, Interaction homme-machine pour les SI (tome 1); Environnements évolués et évaluation de l'IHM, Interaction homme-machine pour les SI (tome 2)*. Editions Hermes, Paris, 2001.
- [42] Kolski C., Ezzedine H., Abed M. Cycle de développement du logiciel : des cycles classiques aux cycles enrichis sous l'angle des interactions homme-machine. In *Analyse et conception de l'I.H.M., Interaction Homme-Machine pour les S.I. 1*, C. Kolski (Ed.), Editions Hermes, Paris, pp. 23-49, 2001.
- [43] Kolski C., 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), pp. 193-231.
- [44] Keeble R.D., Macredie R.D. Assistant agents for the world wide web intelligent interface design challenges. *Interacting With Computers*, 12, pp. 357-381, 2000.
- [45] Lecomte N., Patesson R. Le panel des voyageurs : une étude des activités et des besoins d'information des utilisateurs des transports publics. In *Actes de la conférence ERGO-IHM*, D.L. Scapin and E. Vergison (eds.), pp. 129-135, Biarritz, France, 3-6 oct. 2000.
- [46] Lieberman H. Autonomous interface agents. In *Proceedings of CHI'97 (Human factors in computing systems)*, pages 67-74, Atlanta, GA USA, March 22-27 1997, ACM Press.
- [47] May J., Barnard P.J., Blanford A. Using structural descriptions of interfaces to automate the modelling of user cognition. *User Modelling and adaptive interfaces*, 3, pp. 27-64, 1993.
- [48] Millot P. *Supervision des procédés automatisés et ergonomie*. Hermes. Paris, 1988.
- [49] Moray N. Human factors in process control. In *Handbook of human factors and ergonomics*, G. Salvendy (Ed.), John Wiley & Sons, INC., pp.1944-1971, 1997.
- [50] Nielsen J. *Usability Engineering*. Academic Press, Boston, 1993.
- [51] Nielsen J., Molich R. Heuristic Evaluation of User Interfaces, *Proceedings of CHI '90*, 1990, pp. 249-256.
- [52] Nigay L. *Conception et modélisation logicielles des systèmes interactifs : application aux interfaces multimodales*. Thèse de l'Université Joseph Fourier, Grenoble 1, 1994.
- [53] Norman D.A. Cognitive engineering. In D.A. Norman & S.W Draper (Eds.), *User centred system design : new perspectives on human computer interaction*, Hillsdale, NJ : Erlbaum, 1986.
- [54] Nunes N.J., Cunha J.F. Wisdom, Whitewater interactive system development with object models. In M. van Haemelen (Ed.), *Object modeling and user interface design*, Addison-Wesley, Boston, 2001.
- [55] Oeschger I. XUL 1.0, *XML Based User Interface Language*. Fifth Draft, part of XPToolkit Project, Mozilla.org/xpfe/xulref, open source work, 2001.
- [56] Palanque P., Bastide R. Spécifications formelles pour l'ingénierie des interfaces homme-machine. *Technique et Science Informatiques*, vol. 14, n° 4, p. 473-500,

- 1995.
- [57] Paternò F. *Model based design and evaluation of interactive applications*. Springer-Verlag, London, 2000.
- [58] Petit-Rozé C., Grislin-Le Strugeon E. Systèmes d'information à base d'agents. In R. Mandiau, E. Grislin-Le Strugeon, A. Péninou (Eds.), *Organisation et applications des SMA*, pp. 307-319, Paris: Hermes, 2002.
- [59] Pfaff, G.E. *User interface management system*. Springer-Verlag, 1985.
- [60] Puerta A., Eisenstien J. *XIML: a universal language for user interfaces*. White paper, accessible at: <http://www.ximl.org/>
- [61] Rasmussen J. *Information processing and human-machine interaction, an approach to cognitive engineering*. Elsevier Science Publishing, 1986.
- [62] Reason J. *Human Error*. Cambridge : Cambridge University Press, 1990.
- [63] Scapin D.L., Pierret-Golbreich C. Une méthode analytique de description des tâches. *Colloque sur l'ingénierie des Interfaces Homme-Machine*, Sophia Antipolis, p. 131-148, 1989.
- [64] Scapin D.L., Bastien J.M.C. Analyse des tâches et aide ergonomique à la conception : l'approche MAD*. In Kolski C. (Ed.), *Analyse et conception de l'IHM, Interaction homme-machine pour les SI 1*, p. 85-116, Editions Hermes, Paris, 2001.
- [65] Senach B. Evaluation ergonomique des interfaces homme-machine : une revue de la littérature. Rapport de recherche, INRIA, n°1180, Sophia Antipolis, Mars 1990.
- [66] Shneiderman B. *Designing the user interface : strategies for effective human-computer interaction*. Reading, MA : Addison-Wesley, 1992.
- [67] Sperandio J.C. (Ed.). *L'ergonomie dans la conception des projets informatiques*. Editions Octares Editions, Toulouse, 1993.
- [68] Sweeney M., Maguire M., Shackel B. Evaluating user-computer interaction: a framework. *International Journal of Man-Machine Studies*, 38, 1993, p. 689-711.
- [69] Szekely P. Retrospective and Challenges for Model-Based Interface Development. In *Design, Specification and Verification of Interactive Systems'96, Proceedings of the Eurographics Workshop*, Namur, Belgium, 5-7 June, 1996.
- [70] Stanton N.A. *Human factors in alarm design*. Taylor & Francis, London, 1994.
- [71] Tabary D. *Contribution à TOOD, une méthode à base de modèles pour la spécification et la conception des systèmes*. Thèse de doctorat de l'université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, décembre 2001.
- [72] Tarby J.C., Barthet M.F. Analyse et modélisation des tâches dans la conception des systèmes d'information : la méthode Diane+. In Kolski C. (Ed.), *Analyse et Conception de l'IHM. Interaction Homme Machine pour les SI 1*, pp. 117-144. Paris : Éditions Hermes, 2001.
- [73] Uster G. *Information multimodale*, rapport INRETS-ESTAS, Villeneuve d'Ascq, Mars 1998.
- [74] Vanderdonckt J. Development milestones towards a tool for working with guidelines. *Interacting With Computers*, 12, 81-118, 1999.
- [75] Vanderdonckt J., Farenc C. (Eds.). *Tools for working with guidelines, TFWWG'2000*, Springer, London, 2000.
- [76] Vicente K.J., Rasmussen J. Ecological interface design: theoretical foundations. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 22, pp. 589-606, 1992.
- [77] Whitefield A., Wilson, Dowell J. A framework for Human Factors evaluation. *Behaviour and Information Technology*, Vol. 10, n° 105, 1991, p. 65-79, 1991.