HAL
open science

Multimodalité et plasticité des interfaces homme-machine en informatique ambiante : concepts et espaces de conception

Joëlle Coutaz, Laurence Nigay

▶ **To cite this version:**

Joëlle Coutaz, Laurence Nigay. Multimodalité et plasticité des interfaces homme-machine en informatique ambiante : concepts et espaces de conception. Florence Sèdes, Jean-Marc Ogier, Pierre Marquis. Information Interaction Intelligence - Le point sur le i (3), Cépaduès Editions, pp.179-214, 2012, 236493009x. hal-00752068

HAL Id: hal-00752068

https://hal.science/hal-00752068

Submitted on 14 Nov 2012

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

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

Chapitre 5

Multimodalité et plasticité des interfaces homme-machine en informatique ambiante : concepts et espaces de conception

Multimodalité et plasticité des interfaces homme-machine en informatique ambiante : concepts et espaces de conception

Joëlle Coutaz et Laurence Nigay

LIG, Laboratoire d'Informatique de Grenoble
Equipe Ingénierie de l'Interaction Homme-Machine
B.P. 53 - 38041 Grenoble Cedex 9
Joelle.Coutaz@imag.fr, Laurence.Nigay@imag.fr

Résumé. Cet article présente deux propriétés clés des interfaces homme-machine (IHM) et leur rôle en informatique ambiante : la multimodalité et la plasticité des IHM. Nous en proposons des définitions, de même des espaces de conception permettant de comprendre la nature de ces notions et d'identifier et comparer des solutions de manière rationnelle. Nous montrons comment la multimodalité participe à la plasticité des IHM.
Mots clefs : modalité, IHM multimodale, multimodalité, IHM plastique, plasticité des IHM, adaptation des IHM, espace problème, espace de conception.

Abstract : This article presents two key properties for user interfaces (UI) in the context of ambiant computing : UI multimodality and UI plasticity. These concepts are defined, and design spaces are proposed to improve our understanding of the nature of these concepts, as well as to identify and compare design solutions in a rational manner. We show how plasticity can exploit modalities for reshaping user interfaces.
Keywords : modality, multi-modal user interface, multi-modality, plastic user interface, user interface plasticity, user interfaces, adaptation, problem space, design space.

1 Introduction

L'informatique ambiante, que l'on décline sous différents termes[1], correspond à cette révolution technique envisagée il y a une quinzaine d'années par Weiser [65]. Par opposition à l'informatique traditionnelle, la nouveauté tient aux capacités de mobilité et d'intégration des systèmes dans le milieu physique [38], et ceci de manière spontanée, à de multiples échelles, de la planète au micro-, voire nano-objet. Sur le plan technique, cette vision se traduit par la composition de services de toutes sortes s'appuyant sur une infrastructure à granularité et géométrie variables. La finalité est l'amplification de l'espace physique au moyen de services numériques formant un tout adapté à l'Homme. Dans cette perspective, la conception, le développement et l'évaluation des interfaces homme-machine (IHM) imposent de nouveaux requis. Il ne suffit plus d'envisager des IHM pour la seule station de travail conventionnelle utilisée en un lieu fixe pour un utilisateur cible bien identifié. Il convient de passer des IHM centralisées, rigides et monomodales, aux IHM distribuées, nomades, multimodales et plastiques.

En réponse à la complexité et à la nouveauté du problème, nous proposons la démarche scientifique suivante :

• En premier lieu, identifier les concepts et taxonomies pertinentes pour comprendre la nature du problème, produire de nouvelles solutions et raisonner sur ces solutions,

• Ensuite, traduire ces éléments conceptuels sous forme d'architectures logicielles, d'outils de mise en œuvre ou de nouvelles techniques d'interaction, mais aussi définir de nouvelles méthodes d'évaluation.

Cet article traite du premier point. En effet, dans toutes les disciplines scientifiques, tout nouveau domaine émerge avec la définition de concepts partagés par une communauté, organisés si possible en espaces problème ou espaces taxonomiques. On trouvera dans [5] [14] [15] [54] des éléments de solutions techniques en réponse aux problèmes posés. Dans la première partie de l'article, nous soulignons l'étendue des possibilités de l'informatique ambiante pour l'Interaction Homme-Machine. Nous présentons ensuite un espace de conception pour la multimodalité en définissant une modalité d'interaction et les formes de multimodalité. Nous procédons de manière similaire avec la plasticité (définition et espace problème) où la multimodalité est exploitée comme support au remodelage des IHM.

2 Informatique ambiante : un vaste espace de possibilités

Jusqu'ici, l'innovation en Interaction Homme-Machine reposait pour l'essentiel sur l'invention de nouvelles techniques d'interaction dont l'usage combiné sous forme d'IHM multimodales visait une communication plus efficace et plus naturelle entre l'homme et l'ordinateur. Ainsi, un microphone couplé à une souris [43], deux souris manipulées simultanément [21], deux jetons déplacés comme à la figure 1 [4], une caméra couplée à

---

[1] On relève également les termes : informatique ubiquiste (ubiquitous computing), ordinateur évanescent (disappearing computer), informatique pervasive (pervasive computing), informatique augmentée (augmented computing), ou encore objets communicants et systèmes embarqués (embedded systems), chacun mettant en relief une propriété particulière de ces futurs systèmes (qui ne formeront peut-être, plus qu'un !). Cette diversité de nomenclature traduit l'instabilité des concepts, un espace problème aux contours mal cernés, en tout cas, un domaine qui se construit.

une souris [10], illustrent ces objectifs. Mais toutes ces techniques supposaient un même espace d'interaction : l'ordinateur de bureau.

Or, la diversité et le succès des ordinateurs de poche et des téléphones mobiles, la généralisation des capteurs et des réseaux, la multiplication des systèmes embarqués dans des objets d'usage courant (automobile, télévision, etc.) offrent de nouvelles perspectives : l'espace physique est le lieu d'interaction et le contexte d'usage redevient une notion de tout premier plan.

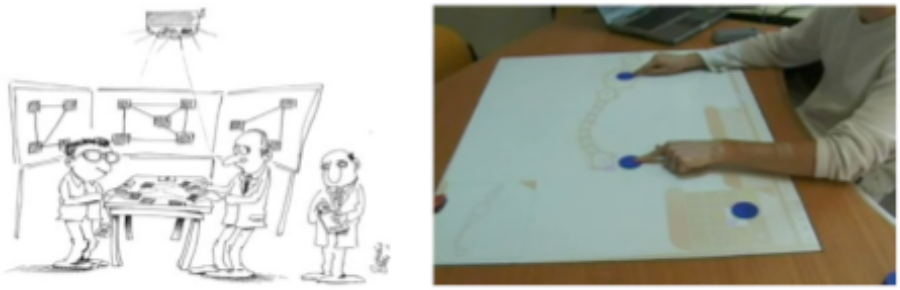


FIG. 1 – *NAVRNA : Environnement augmenté. Un graphe d'ARN est projeté sur une table à l'aide d'un projecteur vidéo. Les biologistes manipulent le graphe avec des jetons (interfaces tangibles multimodales). Les murs permettent d'afficher d'autres graphes d'ARN qui peuvent être glissés sur la table.*

2.1 L'espace physique comme lieu d'interaction

Les objets physiques jouent maintenant le rôle de ressources d'interaction [6]. On parle alors d'interfaces tangibles [31]. Par exemple les Media Blocks [61] reposent sur l'utilisation d'icônes physiques (des cubes) permettant de manipuler des objets numériques et programmer la télévision par exemple. De même, dans notre système interactif de retouche d'images de la figure 2, fondé sur les pixels miroirs [63], l'utilisateur manipule les instruments de son métier : un pinceau, un crayon et une gomme. L'apport majeur est la souplesse offerte : l'utilisateur a le choix, à tout instant, entre les instruments de son métier et les outils informatiques. Il peut dessiner avec son feutre favori puis changer la couleur du trait au moyen des services numériques.

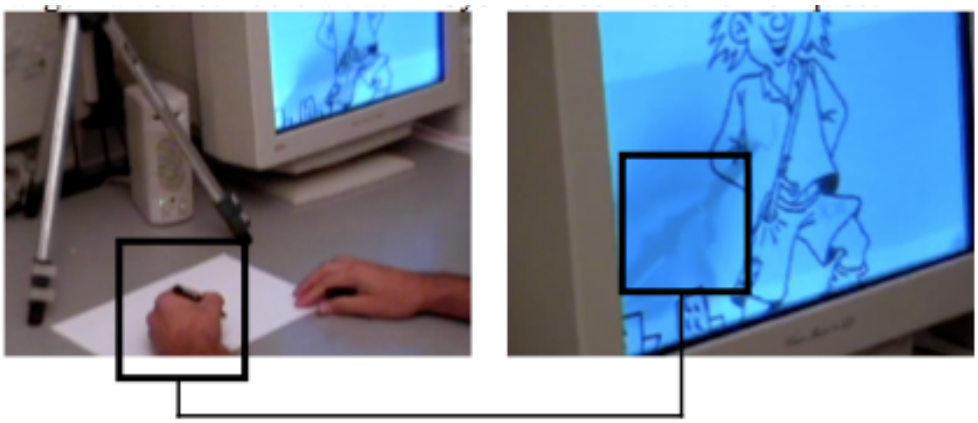


FIG. 2 – *Système interactif de retouche d'images fondé sur les pixels miroirs.*

La main, avec l'alignement des doigts, offre l'opportunité d'un affichage par lignes (Figure 3). Les systèmes de chirurgie assistée par ordinateur comme le système CASPER [30] de la figure 4, utilisent des localisateurs 3D pour suivre les outils chirurgicaux dans des images médicales acquises en phase préopératoire. L'espace d'interaction sort alors définitivement de l'espace composé du bureau et de la station de travail.

FIG. 3 – *La main comme dispositif de sortie. Image extraite de [3].*

FIG. 4 – *Système interactif CASPER en cours d'utilisation : Organisation du bloc opératoire lors de l'utilisation de CASPER en phase de guidage.*

2.2 Contexte d'usage

L'importance du contexte d'usage est reconnue depuis longtemps en conception des systèmes interactifs. La conception contextuelle (contextual design) de Beyer et Holtzblatt, fondée sur la collecte et l'organisation de données de terrain (contextual inquiry), en est un exemple type [12]. Les modèles de l'Action Située (Situated Action) [56], la Théorie de l'Activité [7], ou encore la Cognition Distribuée (Distributed Cognition) [35] visent autre chose que la décomposition stricte de GOMS [20] en tâches et sous-tâches en considérant le contexte comme élément directeur.

Si le contexte est une notion admise depuis longtemps en conception des systèmes interactifs, en pratique il n'est utilisé qu'en phase amont du processus de développement. Tout ce qui relève du contexte se dilue progressivement au cours du processus de développement et le triangle classique en IHM « utilisateur-tâche-machine » ne fonctionne que pour un contexte statique prévu à l'avance. Avec l'émergence de l'informatique ambiante, le contexte est redécouvert et placé au cœur des débats sans pour autant faire l'objet d'une définition consensuelle claire et définitive.

Toutefois, l'analyse de l'état de l'art [25] conduit à ce double constat : (1) Il n'y a pas de contexte sans contexte [18]. Autrement dit, le contexte n'existe pas en tant que tel. Il émerge, ou se définit, pour une finalité (ou utilité) précise. (2) Le contexte est un ensemble d'informations structurées, partagé et évolutif qui sert l'interprétation [66]. La nature des informations, de même, l'interprétation qui en est faite, dépendent de la finalité. La finalité que nous retenons ici, c'est assurer la plasticité des IHM pour servir au mieux l'utilisateur en respectant ses capacités sensori-motrices, ses intentions et son système de valeurs. Dans cette perspective, nous définissons le contexte d'usage par un ensemble d'informations structurées en trois volets : <utilisateur, plate-forme, environnement physique et social>. Nous reviendrons sur ces trois volets dans la section 4 sur la plasticité des IHM. On

trouvera dans [51] [24], une définition formelle générique de cette notion, de même un exemple de mise en œuvre technique.

3 Multimodalité et ses concepts

3.1 Bref historique : centrage sur les modalités d'entrée puis de sortie

La multimodalité est étudiée aux Etats-Unis dès les années quatre vingt : en particulier, Richard Bolt [13] propose le paradigme du "mets ça là" fondé sur l'usage combiné de la parole et du geste. En 1983, Nicholas Negroponte fonde le MediaLab au MIT avec, comme objectif, l'étude de l'intégration de ces nouvelles technologies. En France, la prise de conscience a lieu plus tard avec la création en 1990 d'un groupe d'étude au sein du GdR-PRC CHM.

Les travaux se sont d'abord fixés sur la multimodalité en entrée (de l'utilisateur vers le système), mettant en jeu plusieurs dispositifs physiques d'entrée [17] [34] [43] [39] [41] pour ne citer que certains travaux français. Peu de travaux se sont intéressés à la conception de la multimodalité en sortie (du système vers l'utilisateur). Les travaux existants n'adoptent pas de point de vue global sur l'interaction multimodale en sortie. En effet, certains étudient la pertinence de l'information véhiculée par les modalités, d'autres l'accès aux documents et aux postes de travail pour les handicapés (en particulier visuels). Enfin, certains étudient la génération automatique d'énoncés multimodaux du point de vue des supports de l'information, le terme multimédia y étant le plus souvent retenu. Nous notons néanmoins deux thèses, celle de F. Vernier [62] et celle plus récente de C. Rousseau [52], toutes deux consacrées à l'interaction multimodale en sortie.

Parce que les acteurs de l'interaction, l'homme et la machine, posent des problèmes différents, les notions de multimédia et de multimodalité sont appréhendées selon différentes perspectives, les unes centrées sur l'humain, les autres sur la technologie. Dans [46], nous proposons une revue terminologique des termes multi- (modalité, média et mode). Parce que nos travaux sont dédiés à la conception d'interfaces homme-machine, il convient d'adopter une définition de la modalité qui couvre les deux angles d'étude : l'utilisateur et le système interactif.

À cette fin, nous définissons une modalité par le couple <p, r> où :

• p désigne un dispositif physique ou ressource d'interaction (par exemple, une souris, une caméra, un écran, un haut-parleur),

• r dénote un système représentationnel ou langage, c'est-à-dire un système conventionnel structuré de signes assurant une fonction de communication (par exemple, un langage pseudonaturel, un graphe, une table).

L'expression BNF suivante est la définition complète de la notion de modalité, une modalité pouvant aussi jouer le rôle de dispositif auprès d'un système représentationnel (Martin parle de transfert de modalités [41]) :

modalité ::= <p, r> | <modalité, r>

Par exemple, dans le système MATIS [43], un utilisateur peut formuler des requêtes de renseignements sur des horaires d'avion en saisissant au clavier une phrase en langage naturel comme "Flights from Pittsburgh to Boston", ou bien énoncer oralement cette même phrase, ou encore remplir un formulaire par manipulation directe. On assiste ici à trois modalités :

<clavier, langage naturel>, <microphone, langage naturel>, <souris, formulaire graphique>.

FIG. 5 - *Interface incorporée pour la gestion du courrier électronique sur ordinateur de poche. Modalité = <ordinateur de poche, langage gestuel>.*

Si nous considérons les systèmes présentés dans [34], qui relèvent des interfaces manipulatrices ou interfaces incorporées ("embodied user interface"), l'utilisateur tient dans la main un ordinateur de poche augmenté de capteurs. Pour parcourir une liste séquentielle, il incline l'ordinateur de poche. La vitesse de défilement est fonction de l'inclinaison, c'est-à-dire de l'amplitude du mouvement du poignet. L'utilisateur arrête le défilement en relevant l'ordinateur de poche vers sa position neutre, l'horizontale, ou en exerçant une pression des doigts sur le côté. La modalité d'interaction est alors décrite par le couple <ordinateur de poche, langage gestuel>. Dans notre système de gestion de courrier électronique [67] de la figure 5, le langage gestuel est simple. Il correspond à la spécification de huit commandes comme l'ouverture d'un message par un mouvement vertical du bas vers le haut de l'ordinateur de poche, ou le défilement de la liste de messages reçus par inclinaison de l'ordinateur de poche. De façon similaire, la modalité de localisation d'un utilisateur mobile est décrite par le couple <GPS, localisation en données GPS>.

De manière orthogonale à notre définition de la notion de modalité par le couple <p, r>, nous distinguons deux classes de modalités : les *modalités actives* et les *modalités passives*.

• Une modalité d'entrée est *active* lorsque l'utilisateur doit réaliser une action explicite avec un dispositif en vue de spécifier une commande au système comme la parole <microphone, langage pseudo-naturel>. De même, dans les interfaces manipulatives (figure 5), la modalité <ordinateur de poche, langage gestuel> constitue une modalité active, l'utilisateur inclinant l'ordinateur de poche pour faire défiler une liste. Une modalité de sortie est dite active lorsque l'utilisateur doit effectuer une action explicite pour percevoir les informations véhiculées par la modalité, comme tourner la tête pour regarder l'écran du système CASPER de la figure 4 afin d'obtenir des informations de guidage lors de l'opération chirurgicale.

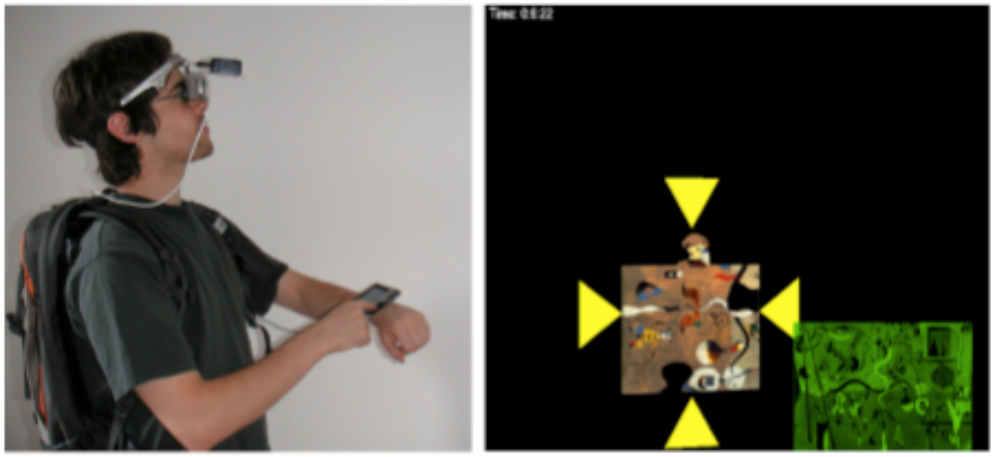
• Une modalité est *passive* (ou *implicite*) lorsque le dispositif qui la constitue ne requiert pas l'attention ni d'action explicite de la part de l'utilisateur. Le couple <GPS, localisation

en données GPS> qui correspond à la capture par un GPS de la localisation d'un utilisateur mobile, est une modalité passive. De nombreuses interfaces (interfaces sensibles au contexte et "perceptual user interfaces" [60]) exploitent des modalités d'entrée passives pour améliorer la robustesse et l'efficacité de l'interaction. De même, de nombreux systèmes de réalité augmentée sur supports mobiles reposent sur des modalités de sortie passives exploitant des lunettes semi-transparentes (principe de l'attention minimale, crucial en situation de mobilité).

Notre jeu de réalité augmentée mobile RAZZLE [27] (puZZLE en Réalité Augmentée) illustre les deux classes de modalités actives et passives. Dans RAZZLE, l'utilisateur est équipé d'un laptop placé dans un sac à dos, de lunettes semi-transparentes où s'affichent des informations par dessus le monde physique, d'un magnétomètre pour capter l'orientation du regard, d'un touchpad et enfin d'un microphone. Ainsi équipé (figure 6(a)), l'utilisateur se déplace physiquement sur le terrain de jeu, un espace modélisé au préalable dans le système, pour rechercher et ramasser des pièces de puzzle d'origine numérique éparpillées sur le terrain. Si une pièce de puzzle est dans le champ de vision de l'utilisateur, le système affiche la pièce avec la taille, la position et l'orientation adéquates pour qu'elle semble faire partie du monde physique (figure 6 (b)). L'utilisateur doit alors s'en approcher pour la sélectionner et agir sur elle.

Comme le montre la figure 6 (b), lorsque le joueur est suffisamment proche, la pièce est sélectionnée et le système le signifie à l'utilisateur en affichant des flèches jaunes orientées vers les côtés de la pièce. Le joueur vérifie que la pièce sélectionnée est convenablement orientée en la comparant au puzzle modèle. Il la tourne, s'il en est besoin, pour qu'elle s'insère dans le puzzle. Enfin, il peut la ramasser, soit par un geste de saisie, soit en sélectionnant la pièce en déplaçant un curseur avec le touchpad, soit en énonçant la commande vocale « ramasser ». La pièce ramassée disparaît alors du terrain de jeu, et apparaît clairement à sa place dans le modèle du puzzle affiché dans les lunettes (au lieu d'être estompée).

RAZZLE repose sur de nombreuses modalités d'interaction, actives et passives. En entrée, deux modalités passives : la localisation <GPS, localisation en données GPS> et l'orientation <magnétomètre, orientation 3D en radians> permettent au système de mettre à jour les pièces affichées dans les lunettes semi-transparentes. Trois modalités actives permettent au joueur de ramasser une pièce : <caméra, geste 3D> <touchpad, manipulation directe> (figure 6-a) et <microphone, commande vocale>. En sortie, la modalité est graphique, affichée sur les lunettes semi-transparentes. Cette modalité de sortie est passive et les pièces de puzzle sont perçues comme intégrées au monde physique que constitue le terrain de jeu. Si nous avions utilisé un ordinateur de poche pour afficher les pièces du puzzle proches du joueur, la modalité graphique aurait alors été active puisque le joueur aurait alors dû explicitement regarder l'écran de l'ordinateur de poche pour détecter la disponibilité d'une pièce.



(a) (b)

FIG. 6 - *RAZZLE : (a) Un joueur équipé. (b) Dans les lunettes semi-transparentes, les pixels noirs sont transparents. Le modèle du puzzle est affiché en permanence dans les lunettes en bas à droite. Dans la vue, une pièce du puzzle proche du joueur a été sélectionnée (triangles jaunes autour de la pièce).*

Notre définition d'une modalité par le couple <p, r> identifie et met en relation deux niveaux d'abstraction pertinents tant du côté humain que du côté système : niveau physique porté par la facette p de la modalité, et le niveau logique porté par la facette r. Du côté humain, nous distinguons le niveau perception/action lié au dispositif physique, du niveau cognition en relation avec le système représentationnel. Du côté système, nous différencions le dispositif physique mis en jeu et le format des expressions échangées. Aussi une modalité <p, r> nous permet d'envisager la définition d'un cadre de conception qui recouvre à la fois les perspectives utilisateur et système selon deux niveaux d'abstraction : physique et logique.

3.2 Multimodalité et cadres de conception

Partant de notre définition <p, r>, l'étude de la multimodalité en entrée [45] tout comme celle de la multimodalité en sortie [64], implique de considérer le nombre de dispositifs et de systèmes représentationnels que le système autorise. Ainsi, la multimodalité suppose les trois possibilités suivantes :

- Multi-dispositifs et mono-système représentationnel
- Multi-dispositifs et multi-systèmes représentationnels
- Mono-dispositif et multi-systèmes représentationnels

La composition de modalités graphiques constitue un exemple d'interface multimodale en sortie de type mono-dispositif (un écran) et multi-systèmes représentationnels (comme un tableau et un histogramme). Notons que dans ce cas, certains auteurs [42] préfèrent le terme multicode à multimodal, le terme multimodal étant alors associé au fait qu'il y ait plusieurs dispositifs sollicitant des capacités sensorielles humaines différentes (plusieurs modalités sensorielles) [52]. Nous discernons deux volets dans la conception d'IHM multimodale : (1) le choix des dispositifs et des systèmes représentationnels et (2) la

composition de modalités. Les propriétés CARE (Complémentarité, Assignation, Redondance et Equivalence) [23] traduisent ces deux aspects.

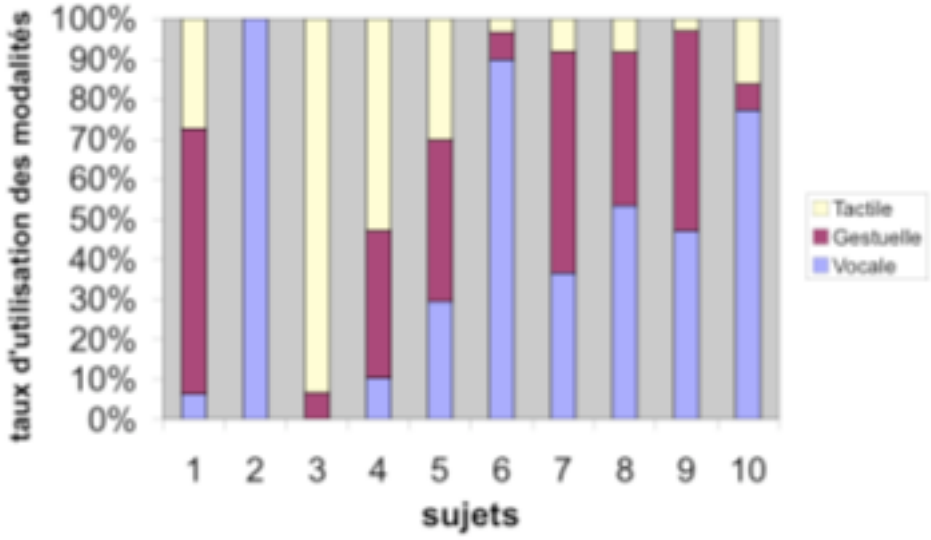


FIG. 7 - *RAZZLE Taux d'utilisation des trois modalités équivalentes par sujet (toutes commandes et sessions confondues).*

Dans CARE, l'existence de choix de modalités se traduit par *l'équivalence* tandis que *l'assignation* correspond à l'absence de choix. L'équivalence désigne la possibilité pour l'utilisateur (comme pour le système) de choisir entre plusieurs modalités pour atteindre un objectif donné. Par exemple, l'utilisateur de RAZZLE a le choix entre trois modalités équivalentes pour ramasser une pièce de puzzle : modalité gestuelle, modalité tactile et modalité vocale. L'équivalence de modalités offre la flexibilité nécessaire à la variabilité inter/intra individuelle des utilisateurs ainsi qu'à des changements de contexte d'usage. La figure 7 montre le taux d'utilisation des trois modalités équivalentes par chaque joueur RAZZLE (10 joueurs, trois sessions par joueur). Ces résultats soulignent la variabilité inter-individuelle dans l'usage de modalités équivalentes.

La complémentarité et la redondance de CARE traduisent la composition de modalités :

• La *complémentarité* entre dispositifs ou systèmes représentationnels exprime la nécessité d'utiliser tous les dispositifs et/ou tous les systèmes représentationnels pour produire une commande complète. Cela signifie qu'aucun des dispositifs ou systèmes représentationnels ne suffit à lui seul. L'utilisation complémentaire de dispositifs ou de systèmes représentationnels peut être parallèle ou séquentielle. Le système "put-that-there" [13] est l'exemple de référence en matière d'usage complémentaire de modalités : l'utilisateur spécifie une commande vocale de déplacement en complémentarité de l'objet graphique à déplacer et de sa destination spécifiés par le geste. Deux modalités actives sont combinées pour obtenir une commande complète. Dans RAZZLE, deux modalités passives, la localisation et l'orientation, sont complémentaires pour que le système mette à jour l'affichage.

• La *redondance* dénote l'utilisation séquentielle ou parallèle de plusieurs modalités d'interaction qui sont totalement ou partiellement équivalentes. Par exemple, en entrée, la

redondance d'information en provenance de l'utilisateur peut impliquer la prise en compte d'une seule des modalités d'interaction par le système, l'autre pouvant éventuellement contribuer à fiabiliser l'expression obtenue. Par exemple, le montage redondant d'un microphone et d'une caméra qui observe le mouvement des lèvres d'un utilisateur permet d'augmenter la robustesse de la reconnaissance vocale en milieu bruité. De nombreux travaux ont cherché à caractériser plus finement la composition de modalités, comme l'espace TYCOON [41]. Nous proposons un espace intégrateur de ces approches [64]. Cet espace repose sur des aspects et schémas de composition. Nous distinguons les cinq *aspects* suivants :

- Composition temporelle de modalités
- Composition spatiale de modalités
- Composition articulatoire de modalités
- Composition syntaxique de modalités
- Composition sémantique de modalités

Les compositions temporelle, spatiale et articulatoire retiennent le niveau physique d'une modalité, la composition syntaxique concerne le niveau logique tandis que la composition sémantique couvre les relations entretenues entre les informations véhiculées par les modalités. Ces cinq aspects de composition (temporel, spatial, articulatoire, syntaxique et sémantique) sont croisés avec les cinq *schémas* suivants inspirés des relations d'Allen [2] :

- Composition de modalités éloignées
- Composition de modalités avec un point de contact
- Composition de modalités avec une intersection non vide
- Composition de modalités dont l'une est plus étendue et englobe l'autre
- Composition de modalités de même étendue

Par exemple, la composition de modalités de même étendue déclinée selon les cinq aspects de composition définit cinq formes de composition que nous intitulons respectivement : parallèle simultanée, recouvrante, dupliquée, jumelle et totalement redondante.

	***Aspects** d'une composition*				
	temporel	spatial	articulatoire	syntaxique	sémantique
Schéma : Composition de modalités de même étendue	Parallèle Simultanée	Recouvrante	Dupliquée (flot de données dupliquée)	Jumelle	Totalement redondante

Dans [64], nous décrivons l'espace complet. Nous illustrons un cas de complémentarité de deux modalités de sortie avec un prototype de jeu, PUZZLE-RA : un puzzle où des informations de guidage sont affichées sur un mini-écran fixé sur la pièce physique de puzzle. La figure 8 présente les deux versions du prototype. Dans le cas (b) de la Figure 8,

deux modalités M1 et M2 sont utilisées : il s'agit d'un cas de redondance, puisque les deux modalités véhiculent la même information de guidage. Nous affinons cette composition de modalité en la décrivant selon notre espace « Aspect x Schéma » comme suit :

	***Aspects** d'une composition*				
	temporel	spatial	articulatoire	syntaxique	sémantique
Schéma	Parallèle	Disjointe	Indépendante	Différente	Totalement redondante

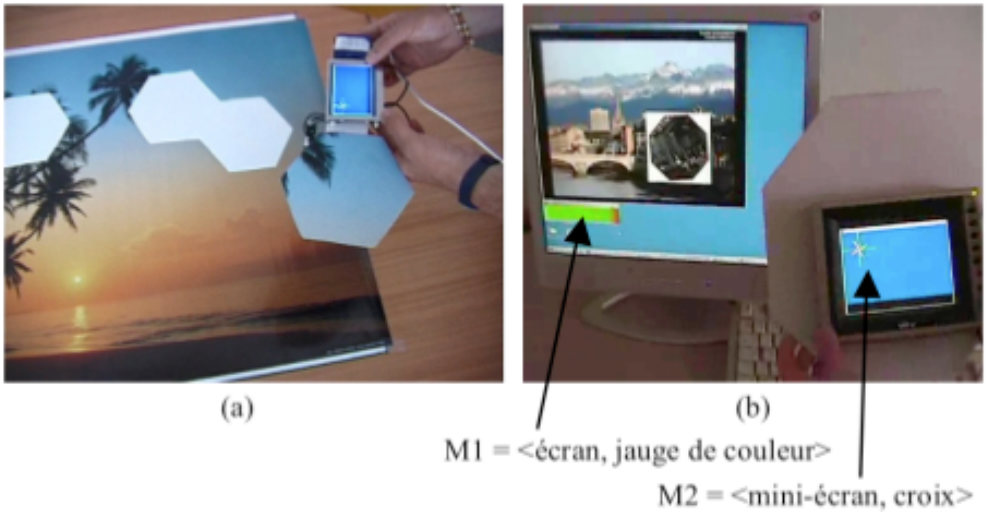


FIG. 8 - *PUZZLE-RA : un puzzle exploitant un mini-écran attaché à la pièce physique de puzzle. (a) Version avec un puzzle physique. (b) Version avec un puzzle numérique affiché à l'écran.*

En synthèse, nous proposons d'étudier la multimodalité selon deux angles d'étude : caractérisation d'une modalité et composition de modalités.

• Nous caractérisons une modalité selon deux niveaux d'abstraction : dispositif physique et système représentationnel logique. La caractérisation d'une modalité est cruciale pour choisir la modalité idoine, que ce choix revienne au concepteur, au système, ou à l'utilisateur. On trouvera dans [14] et [64] une définition de ces caractéristiques.

• Nous caractérisons la composition de modalités dans un espace de conception (Aspect x Schéma) qui identifie 25 possibilités. L'une des contributions importantes de cet espace est d'unifier et d'affiner d'autres espaces de conception (dont CARE et TYCOON).

Par souci de complétude, il convient d'étudier l'impact des éléments de notre espace de conception sur la conception logicielle du système interactif et sur son utilisabilité.

3.3 Impact sur la conception logicielle et l'utilisabilité

Notre espace de conception, s'il traduit les possibilités en termes de modalités et de compositions, ne peut néanmoins servir de guide à la conception tant que les types de modalités et de compositions ne sont pas caractérisés en termes d'utilisabilité. À cette fin, nous développons un outil de conception et de mise en œuvre qui rend opérationnels les éléments de notre espace de conception. Une première version de l'outil est disponible : la plate-forme ICARE [14] [15]. Cet outil, utilisable aussi bien pour le prototypage rapide que pour la réalisation de l'application finale, doit permettre d'accélérer le processus de création de systèmes multimodaux, de capitaliser les expériences, et de faire émerger des règles de conception. Cet outil nous sert de moyen d'enrichissement de notre espace de conception dans l'objectif de définir une théorie de la multimodalité qui permettrait, entre autres, de rationaliser, voire automatiser, le choix de modalités simples et composées. Comme nous le disions précédemment, le choix de modalités prend trois formes complémentaires :

1. Assignation par le concepteur : les modalités et leurs usages sont fixés par le concepteur.
2. Adaptativité : les choix des modalités et de leurs usages sont réalisés par le système sans intervention humaine explicite.
3. Adaptabilité : les modalités et leurs usages sont choisis par l'utilisateur. Le système propose un ensemble de modalités équivalentes, un mécanisme permettant alors à l'utilisateur d'effectuer son choix. (À cet effet, nous verrons plus loin le concept de méta/extra-IHM.)

Dans le cas 1, les choix des modalités et de leurs usages sont effectués en phase de conception, tandis que dans les cas 2 et 3 les choix ont lieu à l'exécution et nécessitent un modèle du contexte d'usage. Dans le cas 2, le système est autonome (attention à ne pas surprendre l'utilisateur !), tandis que dans le cas 3, l'utilisateur garde le contrôle (attention à ne pas solliciter l'utilisateur indûment !). Dans la pratique actuelle, le choix de modalité revient le plus souvent à l'utilisateur, mais des travaux importants comme ceux de Y. Bellik sur le choix autonome des modalités de sortie commencent à voir le jour [9]. En effet, en l'absence de « bon modèle » du contexte d'usage, l'utilisateur est le mieux placé pour effectuer le choix qui lui convient. Encore faut-il que le système donne accès à ces possibilités d'expression de choix. Expression des possibilités et contexte d'usage sont des éléments clefs en plasticité des IHM.

4 Plasticité des IHM

4.1 Définition

Nous avons introduit la propriété de plasticité en 1999 [58] avec la première thèse en France sur le sujet en 2001 [59]. Par analogie à la plasticité d'une matière, du cerveau, des animaux et des plantes, la *plasticité* d'une IHM dénote sa capacité d'adaptation au contexte d'usage dans le respect de son utilisabilité [8] ou de sa valeur [22].

Comme nous l'avons justifié en 2.2, le contexte d'usage comprend trois volets : un modèle de l'utilisateur, de la plate-forme et de l'environnement physique et social.

• Le modèle de l'utilisateur inclut toutes les caractéristiques pertinentes à propos de l'utilisateur final (notamment ses capacités sensori-motrices et cognitives, ses centres d'intérêt, l'identification de la tâche ou activité courante),

• Le modèle de la plate-forme inclut la description des ressources de calcul (les nœuds de la plate-forme et les services logiciels que ces nœuds abritent), les ressources de

communication et d'interaction actuellement disponibles, et notamment les modalités – simples ou composées, disponibles sur chacun des nœuds.

• La notion d'environnement physique et social reste peu formalisée dans la littérature. Elle dénote le milieu dans lequel s'exerce l'interaction homme-machine. En plasticité, les éléments pertinents sont susceptibles d'influencer la réalisation de la tâche : le lieu géographique ou symbolique (à domicile, au cinéma, dans la rue, dans le train), le jour (ouvrable, férié), l'heure (de jour, de nuit), l'ambiance (fréquenté, bruyant) en sont des exemples. Typiquement, en lieu public fréquenté, le téléphone portable devrait commuter vers une manifestation plus discrète telle que le mode vibreur. De la même façon, les messages textuels sont préférables aux communications audio perturbantes pour autrui. Ces adaptations relèvent de l'accessibilité topologique et temporelle du dispositif d'interaction.

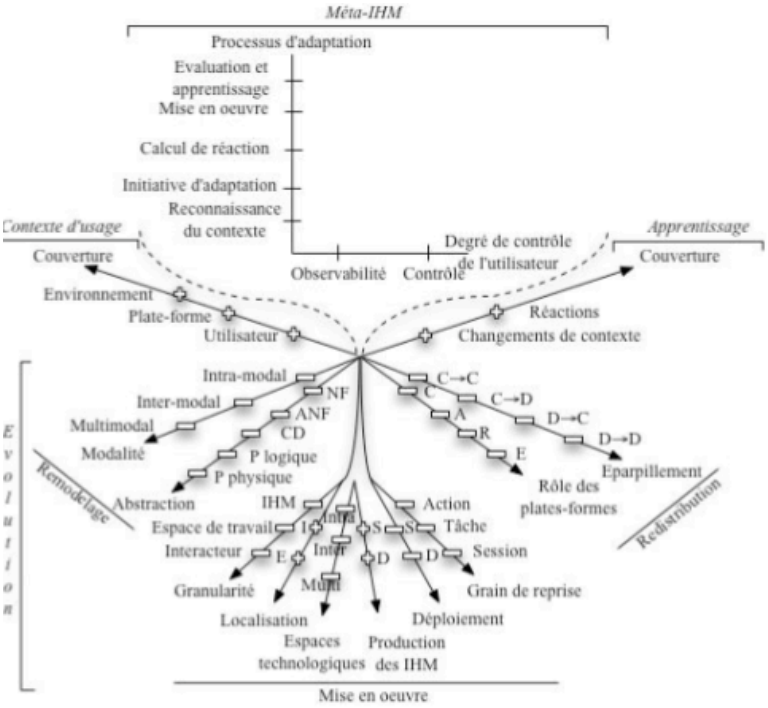


FIG. 9 - *Espace problème de la plasticité des IHM. Les croix (+) dénotent des valeurs non exclusives contrairement aux tirets (-) [Tiré de la thèse HDR de G. Calvary, 2007].*

4.2 Espace problème de la plasticité des IHM

La figure 9 présente les dimensions de l'espace problème de la plasticité des IHM tandis que la figure 10 en offre une vision technique simplifiée. Cet espace problème est à destination des concepteurs pour les aider à (a) imaginer des solutions innovantes et (b) se poser les bonnes questions quant à leur ingénierie. Il ne prétend pas à l'exhaustivité, mais compile un ensemble de questions en cours d'exploration dans la littérature ou à investiguer. Nous les présentons en détail dans cette section.

La décomposition fonctionnelle de la figure 10 montre que la plasticité s'appuie sur des fonctions de reconnaissance du contexte d'usage ; qu'elle consiste à calculer l'évolution du

système interactif sur changement de ce contexte ; que cette évolution peut être apprise ; et enfin que l'ensemble du processus peut être placé sous l'observabilité et/ou le contrôle de l'utilisateur via une méta-IHM. Nous avons vu (très brièvement) le problème du contexte d'usage en 2.2. Nous examinons plus avant l'évolution, l'apprentissage et la notion de méta-IHM tout en faisant référence aux éléments taxonomiques de la figure 9.

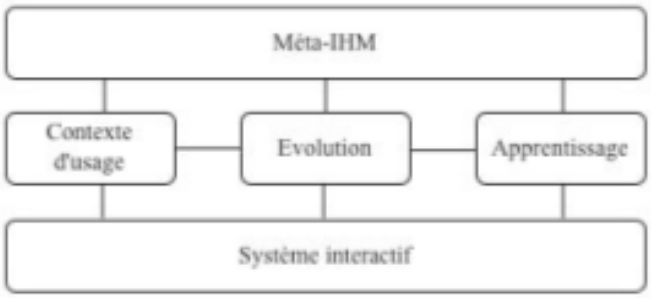


FIG. 10 - *Décomposition fonctionnelle (simplifiée) d'un système interactif plastique..*

4.3 Évolution

L'évolution est en charge du calcul et de la mise en œuvre de la réaction suite à un changement du contexte d'usage. Il existe pour cela deux leviers : le remodelage et la redistribution.

• Le *remodelage* désigne le changement de forme de tout ou partie de l'IHM.

• La *redistribution* correspond à la migration de tout ou partie de l'IHM sur des ressources d'interaction gérées par des nœuds distincts de la plate-forme.

L'exemple de la version plastique du site de Sedan-Bouillon, site web de promotion des pays de Sedan et Bouillon, illustre l'exploitation conjointe de ces deux possibilités. La figure 11 à gauche, montre la page d'accueil visualisée sur un PC. Elle comprend un titre, une barre de navigation et un contenu. L'utilisateur (Lionel), qui se ballade sur le site à partir d'un PC, se connecte également au site via un PDA. La plate-forme comprend maintenant deux nœuds : le PC et le PDA. Une proposition de redistribution de l'IHM lui est faite (figure 11 à droite) : Lionel choisit d'avoir le titre et le contenu sur PC et souhaite disposer sur PDA du titre et de la navigation. La figure 12 montre le résultat. Nous constatons que la barre de navigation, qui vient de migrer du PC vers le PDA, a été remodelée. De même, sur le PDA, le titre contient l'essentiel – le nom du site, mais le slogan « Entrez dans la légende des Pays de Sedan et Bouillon » jugé secondaire par les concepteurs du système, n'a pas été retenu.

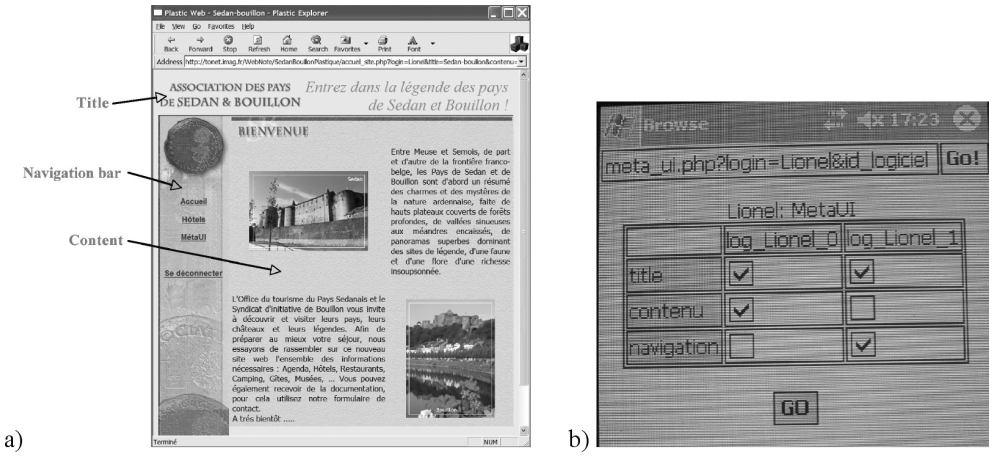


FIG. 11- *Le site Sedan-Bouillon parcouru avec un PC. a) IHM centralisée sur PC. b) méta-IHM pour contrôler la redistribution des pages di site.*

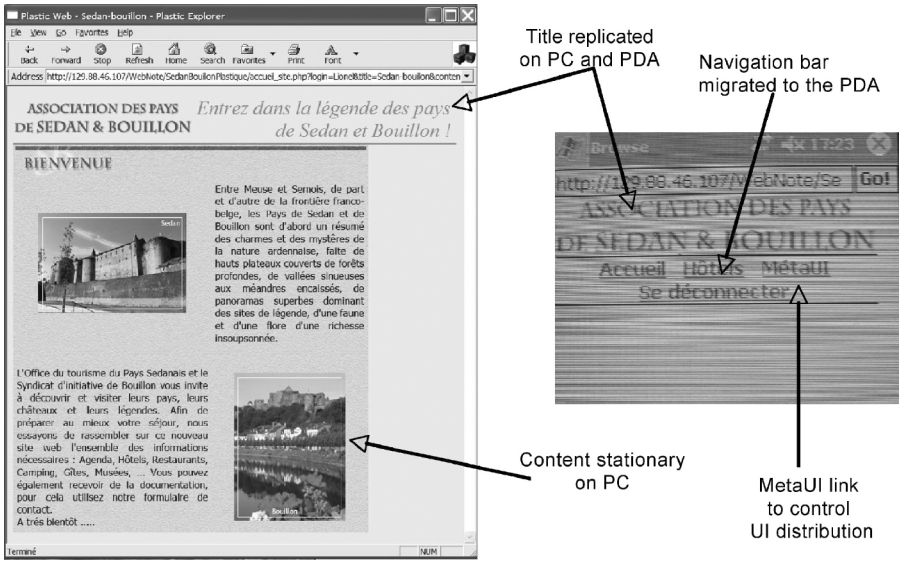


FIG. 12 *–Le site Sedan-Bouillon en version distribuée entre les ressources d'interaction du PC et du PDA.*

C'est par l'étude du remodelage que les recherches en plasticité ont commencé. Un premier résultat de ces travaux est l'identification des niveaux d'abstraction auxquels le remodelage peut avoir lieu. Ces niveaux s'appuient sur l'architecture générale des Model-Based Interface Design Environment (MB-IDE) [57]. Ils distinguent :

• Les tâches utilisateur et concepts du domaine qui décrivent l'interaction homme-machine selon une perspective métier, sans préjuger, si possible, d'une quelconque modalité d'interaction. Des outils tels que CTT [49] pour les tâches et les diagrammes de classe UML pour les concepts sont ici classiques ;

• L'interface abstraite qui structure l'IHM en espaces de travail aussi dits espaces de dialogue ou unités de présentation. Un espace de travail est un « lieu d'activité virtuel offrant les éléments nécessaires à la réalisation d'une ou plusieurs tâches » [47]. Dans l'exemple de Sedan-Bouillon, le titre, le contenu et la barre de navigation sont des espaces de travail ;

• L'interface concrète fait le choix des modalités d'interaction (interacteurs) pour :

- Les espaces de travail alors réifiés en fenêtres ou canevas (dans le cas de modalités graphiques) ;

- Les enchaînements entre espaces qui se traduisent par des séparateurs (en modalité graphique : espace ou trait) ou par des interacteurs de navigation (en modalité graphique : boutons, liens hypertexte) ;

- Les tâches élémentaires et concepts du domaine matérialisés, dans le cas de modalités graphiques, en boutons radio, cases à cocher, images, etc.

• L'interface finale fait le choix d'un langage de programmation et d'environnement d'exécution.

Ces niveaux d'abstraction sont généraux. Aussi, ont-ils été repris en plasticité pour raisonner sur l'ingénierie et la rétro-ingénierie d'IHM plastiques. Le projet européen CAMELEON en fait son cadre de référence qu'il enrichit de préoccupations propres à la plasticité, à savoir [19] :

• L'identification des contextes d'usage et changements de contexte d'usage que le système interactif a pour ambition de couvrir ;

• L'utilisabilité (ou la valeur) que l'adaptation se doit de préserver ;

• L'adaptation à appliquer ;

• L'infrastructure d'exécution pour la mise en œuvre de l'adaptation.

De façon plus précise (Figure 13) :

• Le contexte d'usage s'exprime en termes d'utilisateur, de plate-forme et d'environnement. Chaque contexte peut justifier une conception/rétro-conception spécifiques [16]. Sur la figure 13, deux fils d'ingénierie sont prévus pour couvrir les deux contextes d'intérêt retenus ;

• L'utilisabilité requiert la définition de critères et métriques. Elle fixe la qualité de service attendue ;

• L'adaptation est spécifiée en termes d'évolution et de transition. L'évolution spécifie l'objectif à atteindre (par exemple, migrer lorsque la batterie faiblit), tandis que la transition indique un éventuel accompagnement de l'utilisateur dans le changement. L'hypercurseur des surfaces augmentées [50] en est un exemple ;

• L'infrastructure d'exécution soutient la mise en œuvre de l'adaptation. La mise en œuvre s'appuie sur une connaissance du système interactif dans son état et son histoire (modèles dits observés) ainsi que des mécanismes pour la détection du changement de contexte d'usage, le calcul et la mise en œuvre de l'adaptation (respectivement notés S, C et E sur la figure 13 pour Sensing, Computing et Executing). Ces mécanismes peuvent être généraux, assurés par l'infrastructure d'exécution et/ou spécifiques au système interactif, alors embarqués dans les interfaces finales. Jusqu'ici, les recherches ont majoritairement été menées dans le cadre du graphique, même s'il existe des percées en vocal. On parlera de remodelage *intra-modal* (par exemple graphique vers graphique) lorsque la modalité sensorielle humaine est préservée (le dispositif p est préservé, mais le système représentationnel r change). Le remodelage est *inter-modal* (ou transmodal) lorsqu'il y a changement de modalité simple par une autre modalité simple (à la fois le p et le r sont

modifiés). Le remodelage est *multimodal* dès lors qu'il y a changement dans les combinaisons de modalités selon le cadre *CARE* ou le cadre *Aspect x Schéma* présentés dans la section précédente. Notons qu'un système monomodal peut devenir multimodal et qu'un système multimodal peut devenir monomodal. En pratique, les remodelages inter- et multi-modaux sont encore simplistes telle la combinaison graphique et vocal de Teresa [11].

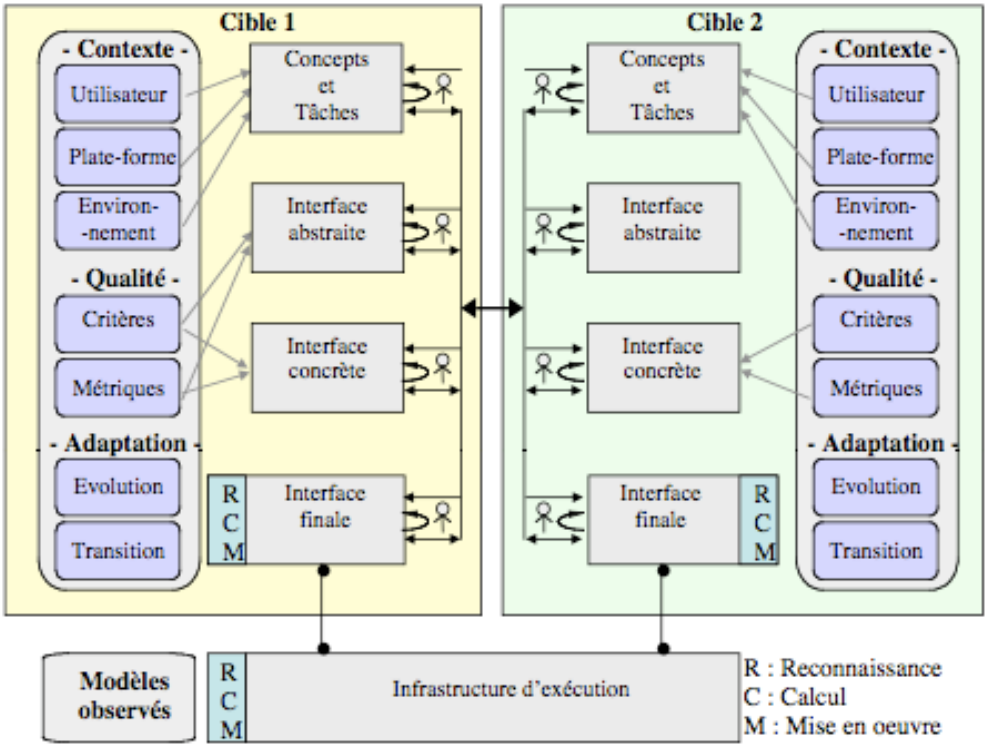


FIG. 13 – Cadre de référence Cameleon pour la plasticité.

La *redistribution* joue sur l'éparpillement de l'IHM sur les ressources d'interaction de la plate-forme. On distingue les redistributions qui conservent l'état centralisé d'une IHM (migration totale du PC vers le PDA ; ces redistributions sont notées C→C sur la Figure 9 pour Centralisée vers Centralisée) ; les redistributions qui éclatent l'IHM la faisant passer d'un état centralisé à distribué (c'est le cas de Sedan-Bouillon de la Figure 12 où les pages du site sont réparties entre le PC et le PDA ; elles sont notées C→D) ; Les redistributions qui la reconcentrent sur un unique ordinateur, la faisant ainsi passer d'un état distribué à centralisé (D→C) ou en changent l'état de distribution (D→D). Dès lors que l'IHM est distribuée, il convient de réfléchir au rôle de chaque nœud de la plate-forme. Ces nœuds sont-ils complémentaires en charge chacun d'un sous-ensemble des tâches utilisateur ? Agissent-ils en totale équivalence permettant à l'utilisateur de réaliser sa tâche soit sur le PC soit sur le PDA, ou à sa convenance ? On voit que les propriétés CARE sont également pertinentes pour raisonner sur la distribution d'une IHM.

D'un point de vue de la mise en œuvre de la réaction, qu'il s'agisse de remodelage et/ou redistribution, six dimensions sont à considérer :

• La granularité de l'adaptation. L'adaptation se fait-elle au grain de la modalité (interacteur), compactant par exemple un jeu de boutons radio en un menu déroulant ? Se fait-elle au grain de l'espace de travail, c'est-à-dire d'un ensemble de tâches logiquement connectées (modification d'un canevas ou d'une fenêtre en graphique) ? Ou modifie-t-elle au contraire toute l'IHM ?

• La localisation interne (aussi dite close, notée I) et/ou externe (aussi dite open, notée E) de l'adaptation [48]. Il s'agit ici de décider qui de l'IHM (interacteur, espace de travail ou application) ou d'un tiers (un intergiciel de l'adaptation) embarque les mécanismes d'adaptation. Aujourd'hui, aucune recommandation n'existe sur l'équilibre interne/externe. Typiquement, des critères de performance ou d'ouverture peuvent être considérés. Les approches à services poussent très fort vers l'ouverture. L'opportunisme qu'elles laissent percevoir (j'arrive à la gare, je dispose d'un service imprévu) va dans le sens de l'informatique ambiante ;

• Les espaces technologiques au sens de l'Ingénierie Dirigée par les Modèles (IDM ou Model Driven Engineering en anglais), par exemple, JAVA, HTML, etc.). L'adaptation est-elle intra-espace technologique (par exemple, JAVA vers JAVA), inter-espaces (par exemple, HTML vers JAVA) ou multi-espaces combinant par exemple JAVA et HTML avant et après transformation ?

• La production statique (S) et/ou dynamique (D) des IHM. Les IHM sont-elles préfabriquées (statiques) et/ou générées à la volée (dynamiques) ? Dans Artistic Resizing [29], c'est un mixte de statique et de dynamique qui est opéré. Les IHM sont préfabriquées à des instants clés de l'interaction (échantillonnage et création par des designers) ; les transitions sont calculées à la volée ;

• Le déploiement statique (S) ou dynamique (D) de l'adaptation. L'utilisateur doit-il quitter sa session (statique) le temps que l'adaptation se fasse ou l'adaptation se fait-elle à la volée (dynamique) permettant, en parallèle, à l'utilisateur de poursuivre sa tâche ?

• Le grain de reprise, qui permet de mesurer en termes d'actions physiques le coût de l'adaptation pour l'utilisateur. Trois grains sont identifiés : l'action physique (l'utilisateur ne perd aucune action lors de l'adaptation – dans Sedan-Bouillon, si l'utilisateur sélectionne « Hotels » sur son site Web, cette sélection est conservée lors de la migration de la barre de navigation sur PDA : l'option « Hotels » y est sélectionnée) ; la tâche (seules les tâches utilisateur achevées sont alors restaurées – les actions physiques contribuant à la réalisation d'une nouvelle tâche sont perdues) ; la session (l'utilisateur redémarre de zéro : il a perdu le bénéfice de toutes ses actions).

De nombreux travaux portent sur la définition de langages de modélisation couvrant les différents niveaux d'abstraction, les liens entre niveaux (mappings) et les transformations. UsiXML en est un exemple représentatif (http://www.usixml.eu/). Rares sont, par contre, encore les travaux centrés sur la valeur des règles d'adaptation en exprimant par exemple, dans les transformations, les propriétés d'utilisabilité qu'elles satisfont [55].

Les référentiels sur l'utilisabilité sont nombreux, provenant aussi bien d'ergonomes que d'informaticiens. Les terminologies utilisées divergent : on parle de facteurs, critères et caractéristiques. Les décompositions diffèrent elles aussi. Dans la mesure où ces référentiels sont des outils de réflexion pour les concepteurs, il semble prudent de laisser ouvert le choix du référentiel permettant ainsi aux concepteurs d'utiliser les outils avec lesquels ils sont familiers. Encore, faut-il, par contre, qu'il existe des 'alignements' pour convertir une propriété exprimée par exemple dans Bastien et Scapin [8] dans le référentiel

de l'ISO (2003). On note à ce sujet, la proposition QUIM (Quality in Use Integrated Map) [53].

M. Florins traite de la conception d'IHM pour plates-formes dégradées [32]. Elle propose des règles de transformation d'IHM permettant de passer d'une plate-forme 'luxe' à une plate-forme moins riche en termes de surface d'affichage par exemple. Les règles interviennent à différents niveaux d'abstraction dans le cadre de référence de la Figure 13. Il n'existe, en revanche, pas d'évaluation permettant de recommander telle ou telle transformation dans tel ou tel changement de contexte d'usage. Typiquement, l'ancrage d'une règle à fort niveau d'abstraction n'est pas forcément de mauvais présage quant à son impact sur l'utilisateur. Si la tâche à laquelle elle correspond n'est par exemple pas fréquente, peut-être vaut-il mieux toucher cette partie de l'IHM qu'une autre partie plus fréquemment sollicitée par l'utilisateur.

Ganneau et al. traitent des règles d'adaptation à l'exécution [33]. Il en propose un métamodèle, mais là non plus n'énonce pas de recommandations ergonomiques pour la plasticité. Des expérimentations sur de vraies applications sont à présent nécessaires. Un apprentissage système peut être aussi envisagé.

4.4 Apprentissage

L'apprentissage est une dimension nouvelle en plasticité. L'idée serait ici d'ajuster les règles d'évolution (par exemple, préférer les remodelages aux redistributions) selon les préférences et habitudes utilisateur. Les travaux en User Modeling et Intelligent User Interfaces entrent dans ce cadre. Les travaux d'A. Hariri pourraient y contribuer [36]. Il s'agira d'apprendre la nature des réactions appropriées (remodelage, redistribution) mais aussi le degré de contrôle et l'IHM que l'utilisateur apprécierait en termes d'adaptation. La section suivante y est consacrée.

4.5 Méta-IHM

Nous avons introduit la notion de Méta-IHM pour exprimer le degré de contrôle accordé à l'utilisateur dans un espace ambiant [26]. L'appellation est aujourd'hui revue [54] pour éviter toute confusion avec le terme « méta » en IDM. En IDM, « méta » fait référence à la relation « est conforme à » ce qui n'est pas le sens dans cette IHM de l'adaptation. « extra » peut lui être préféré, faisant ainsi référence à la notion d'ajout, c.-à-d., d'IHM supplémentaire.

Une *méta/extra-IHM* recouvre l'ensemble des fonctions (et leur IHM) nécessaire et suffisant afin que les utilisateurs puissent contrôler et évaluer l'état de leur espace interactif. Parce qu'une méta/extra-IHM est au-dessus des services métiers de l'espace, elle revêt un caractère *méta/extra*-. Parce qu'elle permet de contrôler et d'évaluer l'état de cet espace, elle a une mission fondamentalement *IHM*. À ce titre, elle doit permettre de répondre aux questions de Bellotti [68] : « *Comment m'adresser au système ? Le système sait-il que je m'adresse à lui ? Est-il prêt à interpréter mes actions ? Exécute-t-il les actions attendues ? Comment éviter les erreurs ? Etc.* »

Au regard du critère de Guidage/sous-critère Retour d'information [8], l'observabilité de l'état du processus d'adaptation est le degré minimum. Au-delà de cette seule observabilité, une négociation peut être opérée entre l'utilisateur et le système. La dominance de l'utilisateur ou du système est à étudier. Cette réflexion est liée aux critères de contrôle explicite et d'adaptabilité qui méritent d'être réexaminés sous cet angle.

Dans le processus d'adaptation, nous distinguons cinq étapes sujettes à observabilité et/ou contrôle : la reconnaissance du contexte d'usage (rendre observable à l'utilisateur l'arrivée d'un SmartPhone par exemple) ; l'initiative de l'adaptation, le calcul et la mise en œuvre de la réaction (migrer vers le SmartPhone) et enfin l'évaluation de la réaction et son apprentissage. Ces étapes sont un affinement de [28]. Le haut de la figure 12 est un exemple de méta/extra-IHM qui permet à l'utilisateur du site Sedan-Bouillon de contrôler la répartition des espaces de travail sur les nœuds disponibles de l'environnement d'exécution.

Contrairement aux autres fonctions de l'adaptation (contexte, évolution, apprentissage), le terrain est quasiment vierge en matière de méta/extra- IHM. On trouvera dans [26] des éléments sur son espace problème. De façon plus générale, ces recherches rejoignent le domaine du « End-User Programming » [40] : l'utilisateur change de statut passant de l'utilisateur au créateur. Bien entendu, cette méta/extra-IHM peut elle-même être plastique, ce qui conduit au problème de la définition de méta/extra-IHM bootstrap.

5 Conclusion

Dans cet article, nous pensons avoir démontré la complexité de la conception des IHM en informatique ambiante. Cette complexité ne pourra être maîtrisée que par la mise en commun des savoirs, non seulement au sein de la discipline IHM, mais aussi avec les autres domaines. Par exemple, les plates-formes ICARE (pour la multimodalité) et MARA (pour la plasticité) en cours de développement dans notre équipe, s'appuient résolument sur les savoir-faire en système répartis à composants orientés service et en Ingénierie Dirigée par les Modèles.

Mais l'hétérogénéité des composants répondant à des méta-modèles différents et implémentés dans des espaces technologiques différents nécessite des alignements dynamiques d'ontologies, encore un domaine auquel il convient de faire appel. Pour revenir au domaine de l'IHM, une définition opérationnelle de l'utilisabilité fait encore cruellement défaut. De (trop) nombreuses règles existent, mais, exprimées en langage naturel, elles ne sont utilisables qu'en phase de conception par des concepteurs (et peut-être, avec un peu de chance, par des développeurs avertis !). Trop peu émerge encore pour l'exécution. Or en informatique ambiante, les concepteurs ne peuvent prévoir toutes les situations d'usage. Le sujet est donc loin d'être clos s'ouvrant sur de nombreuses communautés.

6 Remerciements

Les thèmes de recherche traités dans cet article concernent trois groupes de travail de l'axe « Interaction et Coopéartion » du GDR I3 : le GT 4.3 « Interaction multimodale », le GT 4.6 « CESAME : Conception et Evaluation de Systèmes interactifs Adaptables et/ou Mixtes » et le GT 4.2 « Mobilité et ubiquité ».

Les travaux présentés ont été soutenus par le projet « RA Mobile » financé par France Télécom R&D, l'ACI Masse de Données NavGraphe, les projets européens STREP OpenInterface (FP6-2005-IST5-035182), Camelon (FP5-IST), REX SIMILAR (FP6-2002-IST1-507609), EMODE (ITEA1-call7-if4046), UsiXML (ITEA2-call3-if08026) dédiés à la multimodalité, à la plasticité et à la modélisation des IHM. Nos remerciements particuliers à Gaëlle Calvary pour les travaux soutenus qu'elle mène sur la plasticité des IHM.

Références

[1] M. Alberganti. La boîte grise est condamnée à disparaître, Interview de Jacques Clay, directeur général de la division ordinateurs de bureau de Hewlett Packard. *Le Monde*, 30 avril 1998.

[2] J. Allen. Maintaining Knowledge about Temporal Intervals. `communication of the ACM, 26(11). Nov. 1983, pp. 832-843.

[3] P. Antoniac, P. Pulli, K. Kuroda, D, Bendas, S. Hickey, H. Sasaki. Wireless User Perspectives in Europe: HandSmart Mediaphone Interface, *Wireless Personal Communications*, Vol. 22, 161-174, 2002.

[4] G. Bailly, L. Nigay, D. Auber. NAVRNA : Visualization – Exploration – Edition of RNA. *Proceedings of the conference on Advanced Visual Interfaces AVI 2006*, pages 504-507, New York : ACM Press, 2006.

[5] L. Balme, A. Demeure, N. Barralon, J. Coutaz, G. Calvary. CAMELEON- RT: A Software Architecture Reference Model for Distributed, Migratable, and Plastic User Interfaces, Lecture Notes in Computer Science, Volume 3295 / 2004, *Ambient Intelligence: Second European Symposium, EUSAI 2004*, Markopoulos P., Eggen B., Aarts E. *et al.* (Eds), Springer-Verlag Heidelberg (Publisher), ISBN: 3-540-23721-6, Eindhoven, The Netherlands, November 8-11, 2004, 291-302.

[6] N. Barralon. Couplage de Ressources d'Interaction en Informatique Ambiante. Thèse de doctorat Informatique, Université Joseph Fourier, 8 décembre 2006.

[7] J. E. Bardram. Plans as Situated Action: An Activity Theory Approach to Workflow Systems Proceedings of ECSCW'97 Conference, Lancaster UK, September 1997.

[8] J. Bastien, D. Scapin, *Ergonomic Criteria for the Evaluation of Human- Computer Interfaces*, Rapport technique INRIA, N°156, Juin 1973.

[9] Y. Bellick, Y. *Présentation Multimodale de l'Information.* Habilitation à Diriger des Recherches, LIMSI, Décembre 2006.

[10] F. Bérard. The Perceptual Window: Head Motion as a new Input Stream. *Proceedings of INTERACT'99*, pages 238-244, IFIP IOS Press Publ., 1999.

[11] S. Berti, F. Paternò. Migratory multimodal interfaces in multidevice environments. In Proceedings of the *International Conference on Multimodal Interfaces*, ICMI'05, ACM Publ., 92-99, 2005.

[12] H. Beyer, K. Holtzblatt. Contextual Design. Morgan Kaufman Publ. San Francisco, 1998.

[13] R. Bolt. Put-that-there: Voice and gesture at the graphics interface. *Proceedings of SIGGRAPH'80*, Vol. 14, Issue 3, pages 262–270, New York :**ACM Press, 1980.** résumé en français sous le titre « Résumé ».

[14] J. Bouchet. Ingénierie de l'interaction multimodale en entrée - Approche à composants ICARE. *Thèse de l'Université Joseph Fourier, Grenoble*, 295 pages, 2006.

[15] J. Bouchet, L. Nigay, T. Ganille. ICARE Software Components for Rapidly Developing Multimodal Interfaces, *Proceedings of ICMI 2004*, pages 251- 258, New York : ACM Press, 2004.

[16] L. Bouillon. Reverse Engineering of Declarative User Interfaces, Ph.D. thesis, Université catholique de Louvain, Louvain-la-Neuve, Belgium, 21 June 2006.

[17] M-L. Bourguet, J. Caelen. Interfaces Homme-Machine Multimodales : Gestion des Evénements et Représentation des Informations. *Actes de la conférence ERGO-IA'92*, pages 124-134, AFCET SELF IDLS, 1992.

[18] P. Brézillon. Expliciter le contexte dans les objets communicants. Les Objets Communicants. Hermes Sciences Editions, Lavoisier, Chapitre 21, 295-303, 2002.

[19] G. Calvary, J. Coutaz, D. Thevenin, Q. Limbourg, L. Bouillon, J. Vanderdonckt. A unifying reference framework for multi-target user interfaces, Interacting With Computers, Vol. 15/3, 289-308, 2003.

[20] S. Card, T. Moran, A. Newell. The Psychology of Human-Computer Interaction, Lawrence Erlbaum Associates, 1983.

[21] S. Chatty. Extending a Graphical Toolkit for Two-Handed Interaction. *Proceedings of UIST'94*, pages 195-204, New York : ACM Press, 1994.

[22] G. Cockton. A Development Framework for Value-Centred Design. Extended Abstracts Proc. of CHI 2005, Portland, Oregon, USA, April 2-7, 2005, pp. 1292-1295.

[23] J. Coutaz, L. Nigay, D. Salber, A. Blandford, J. May, R. Young. Four Easy Pieces for Assessing the Usability of Multimodal Interaction: The CARE properties. *Proceedings of INTERACT'95*, pages 115-120, Chapman&Hall, 1995.

[24] J. Coutaz, G. Rey. Foundations for a theory of Contextors. *Proc. Of Computer-Aided Design of User Interfaces III*, J. Vanderdonckt, C. Kolski Eds., Kluver Academic Publ., 13-32, 2002.

[25] J. Coutaz, J. Crowley, S. Dobson, D. Garlan. Context is Key, *Communications of the ACM*, ACM Publ., 48(3), March 2005, 49-53, 2005. [26] Coutaz, J. (2006) Meta-User Interfaces for Ambient Spaces, invited speaker, Tamodia 2006, Coninx, K., Luyten, K., Schneider, K. eds. Hasselt, Belgium, Oct. 2006, Springer LNCS 4385, 1-15

[27] C. Coutrix, L. Nigay. Mixed Reality: A Model of Mixed Interaction. *Proceedings of the conference on Advanced Visual Interfaces AVI 2006*, pages 43-50, New York : ACM Press, 2006.

[28] H. Dieterich, U. Malinowski, T. Kühme, M. Schneider-Hufschmidt. State of the Art in Adaptive User Interfaces. In *Adaptive User Interfaces: Principles and Practice*, Schneider-Hufschmidt & al. (ed.), 13-48, 1994.

[29] P. Dragicevic, S. Chatty, D. Thevenin, J-L. Vinot. Artistic Resizing: A Technique For Rich Scale-Sensitive Vector Graphics. In: Proc. of the *18th ACM Symposium on User Interface Software and Technology (UIST''05)*, Seattle, October 23-26, 2005, ACM Press, 201-210, 2005.

[30] E. Dubois, L. Nigay, J. Troccaz, L. Carrat, O. Chavanon. A methodological tool for computer-assisted surgery interface design: its application to computer-assisted pericardial puncture. *Proceeding of the 9th annual Medicine Meets Virtual Reality Conference MMVR'2001*, pages 136-139, IOS, 2001.

[31] K. Fishkin. A taxonomy for and analysis of tangible interfaces. *Personal Ubiquitous Computing*, Vol. 8, Num. 5, pages 347-358, London : Springer, 2004.

[32] M. Florins, J. Vanderdonckt. *Graceful Degradation of User Interfaces as a Design Method for Multiplatform Systems*. In Proceedings of the 2004 International Conference on Intelligent User Interfaces IUI 2004 (Funchal, Madeira Island, Port., January 13-16, 2004.

[33] V. Ganneau, G. Calvary, R. Demumieux. Métamodèle de Règles d'Adaptation pour la Plasticité des Interfaces Homme-Machine. *Conférence IHM'07*, 2007.

[34] A. Gourdol, L. Nigay, S. Salber, J. Coutaz. Two case Studies of Software Architecture for Multimodal Interactive Systems: VoicePaint and a Voice- enabled Graphical Notebook. *Proceedings of EHCI'92*, pages 271-283, IFIP Transactions Series Amsterdam, The Netherlands: North-Holland, 1992.

[35] C.A. Halverson. Distributed Cognition as a theoretical framework for HCI: Don't throw the Baby out with the bathwater - the importance of the cursor in Air Traffic Control. Tech Report No. 94-03, Dept. of Cognitive Science, University of California, San Diego, 1994.

[36] M.A. Hariri, D. Tabary, C. Kolski. Démarche en vue de la Génération d'Interfaces Mobiles et Plastiques. B. Defude, E. Lecolinet (Ed.), *Actes de la troisième conférence UBIMOB2006 Mobilité et Ubiquité, CNAM, Paris, 5-8 septembre 2006*, ACM Conference Proceedings Series, 127-130, 2006.

[37] B. Harrison, K. Fiskin, A. Gujar, C. Mochon, R. Want. Squeeze me, Hold me, Tilt Me ! An exploration of Manipulative User Interface. *Proceedings of CHI'98*, pages 17-24, New York : ACM Press, 1998.

[38] K. Lyytinen, Y. Yoo. Issues and challenges in ubiquitous computing, *Communications of the ACM,* Volume 45, Issue 12, 62-65, 2002.

[39] C. Mignot, C. Valot, N. Carbonell. An Experimental Study of Future 'Natural' Multimodal Human-Computer Interaction. *Adjunct Proceedings of INTERCHI'93*, pages 67-68, New York : ACM Press, 1993.

[40] B. Myers. Invited Research Overview at *CHI'06* on End-User Programming. Slides available at http://www.cs.cmu.edu/~bam/, 2006.

[41] J-C. Martin. Cadre d'étude de la multimodalité fondé sur les types et buts de coopération entre modalités. *Actes de la conférence InforMatique'94 L'interface des mondes réels & virtuels*, pages 97-106, Montpellier : EC2, 1994.

[42] M. Maybury Ed. *Intelligent Multimedia Interfaces*, ISBN 0-262-63150-4. 405 pages, AAAI/MIT Press, 1993.

[43] L. Nigay. MATIS : un système multimodal d'information sur les transports aériens. *Actes de la Conférence IHM'95*, Vidéo, pages 131-132, Cépaduès, 2005.

[44] L. Nigay, J. Coutaz. A design space for multimodal interfaces: concurrent processing and data fusion. *Proceedings of INTERCHI'93*, pages 172-178, New York : ACM Press, 1993.

[45] L. Nigay, J. Coutaz. A Generic Platform for Addressing the Multimodal Challenge. *Proceedings of CHI'95*, pages 98-105, New York : ACM Press, 1995.

[46] L. Nigay, J. Coutaz. Espaces de conception des interfaces multimédia et multimodales. *Revue TSI*, numéro spécial Multimédia et Collecticiel, Vol. 15, Num. 9, pages 1195-1225, AFCET-Hermès, 1996.

[47] V. Normand, V. *Le modèle SIROCO : de la spécification conceptuelle des interfaces utilisateur à leur réalisation*. Thèse de l'Université Joseph Fourier-Grenoble I, Spécialité Informatique, Avril 1992, 258 pages.

[48] P. Oreizy, R. Taylor, et al. An Architecture-Based Approach to Self- Adaptive Software. *In IEEE Intelligent Systems*, May-June, 54-62, 1999.

[49] F. Paternó, C. Mancini, S. Meniconi. ConcurTaskTrees: A Diagrammatic Notation for Specifying Task Models. In *Proceedings Interact'97*, July'97, Sydney, Chapman&Hall, 362-369.

[50] J. Rekimoto, M. Saitoh. Augmented Surfaces: A Spatially Continuous Workspace for Hybrid Computing Environments, *Proceedings of CHI'99*, ACM Press, 378-385, 1999.

[51] G. Rey. Contexte en Interaction Homme-Machine : le Contexteur. *Thèse de l'Université Joseph Fourier*, 172 pages, 2005.

[52] C. Rousseau. Présentation multimodale et contextuelle de l'information. *Thèse de l'Université Paris-Sud XI*, 197 pages, 2006.

[53] A. Seffah, N. Kececi, M. Donyaee. QUIM: A Framework for Quantifying Usability Metrics in Software Quality Models. I*n Proceedings APAQS Second Asia-Pacific Conference on Quality Software*, December 2001, Hong-Kong, 10-11, 2001.

[54] J.S. Sottet, G. Calvary, J.M. Favre, J. Coutaz. Megamodeling and Metamodel-Driven Engineering for Plastic User Interfaces: Mega-UI, *CHISE book II*, Seffah, A. & Vanderdonckt, J. (Eds), 2007.

[55] J.S. Sottet, G. Calvary, J. Coutaz, J.M. Favre. A Model-Driven Engineering Approach for the Usability of Plastic User Interfaces, In the *proceedings ofEngineering Interactive Systems 2007 joining Three Working Conferences : IFIP WG2.7/13.4 10th Conference on Engineering Human Computer Interaction, IFIP WG 13.2 1st Conference on Human Centred Software Engineering, DSVIS - 14th Conference on Design Specification and Verification of Interactive Systems*, University of Salamanca, Spain, March 22-24, 2007.

[56] L. Suchman. *Plans and Situated Actions*, Cambridge University Press, 1987.

[57] P. Szekely. Retrospective and Challenges for Model-Based Interface Development. In *Proceedings of Computer-Aided Design of User Interfaces*, CADUI'96, J. Vanderdonckt (eds), Presses Universitaires de Namur, 1996.

[58] D. Thevenin, J. Coutaz. Plasticity of User Interfaces : Framework and Research Agenda. In *Proc. Interact99*, Edinburgh, A. Sasse & C. Johnson (Ed), IFIP IOS Press Publ., 1999, 110-117.

[59] D. Thevenin. L'adaptation en Interaction Homme-Machine : le cas de la plasticité. Thèse de doctorat Informatique, Université Joseph Fourier, Décembre 2001, 238 pages.

[60] M. Turk, G. Robertson, Eds. Perceptual user Interfaces. *Communications of the ACM*, Vol. 43, Num. 3, pages 32-70, New York : ACM Press, 2000.

[61] B. Ullmer, H. Ishii, D. Glas. MediaBlocks: Physical containers, transports, and controls for online media. *Proceedings of SIGGRAPH'98*, pages 379- 386, New York : ACM Press, 1998.

[62] F. Vernier. La multimodalité en sortie et son application à la visualisation de grandes quantités d'information. *Thèse de l'Université Joseph Fourier, Grenoble*, 240 pages, 2001.

[63] F. Vernier, C. Lachenal, L. Nigay, J. Coutaz. Interface Augmentée par Effet Miroir. *Actes de la conférence IHM'99*, pages 158-165, Cépaduès, 1999.

[64] F. Vernier, L. Nigay. A Framework for the Combination and Characterization of Output Modalities. *Proceedings of DSV-IS2000*, pages 32-48, LNCS 1946 Springer-Verlag, 2000.

[65] M. Weiser. The computer of the 21st century. *Scientific American*, 265(3), 66-75, 1991.

[66] T. Winograd, T. Architectures for Context. In *Human Computer Interaction*, Vol. 16, 2001, 402-419.

[67] M. Zouinar, P. Salembier, L. Pasqualetti, L. Nigay, G. Calvet, J. Kahn, G. Rey. Chapitre 4, Interaction Multimodale sur des artéfacts mobiles. *Livre Objets Communicants*, ISBN 2-7462-0475-4, pages 63-73, Hermès, 2002.

[68] V. Bellotti, M. Back, K. Edwards, R. Grinter, A. Henderson, C. Lopes. Making Sense of Sensing Systems: Five Questions for Designers and Researchers. In *Proceedings of CHI 2002 Conf.,* Vol. 4(1), ACM New York, 2002, 415–422.