

Un modèle préliminaire du domaine des systèmes mixtes

*Emmanuel Dubois¹, Benoît Mansoux², Cédric Bach³, Dominique Scapin³,
Guillaume Masserey¹, Joël Viala¹*

1

IRIT - LIHS
118, route de Narbonne
31 062, Toulouse Cedex 4.
{Emmanuel.Dubois; Masserey; Viala}@irit.fr

2

CLIPS / TIMC – IMAG
BP 53
38 041, Grenoble Cedex 9.
Benoit.Mansoux@imag.fr

3

I.N.R.I.A. - Rocquencourt,
BP 105,
78153 Le Chesnay Cedex.
{Cedric.Bach; Dominique.Scapin}@inria.fr

RESUME

Cet article propose une approche pluridisciplinaire de la modélisation du domaine des systèmes mixtes. Une telle modélisation, nécessaire pour structurer le domaine récent des systèmes mixtes et pour faciliter la conception et l'évaluation du point de vue génie logiciel et ergonomique, est basée sur la fusion de deux approches : la notation ASUR et un modèle basé sur des recommandations ergonomiques. Les deux approches sont décrites, ainsi que le résultat de leur fusion. Le modèle proposé, une extension de la notation ASUR, est présenté ainsi que ses limites et perspectives.

MOTS CLES : Systèmes mixtes, Modèle de domaine, Recommandations ergonomiques, Notation ASUR.

ABSTRACT

This paper describes a multidisciplinary approach to the modelling of the mixed reality systems domain. Such modelling, useful for structuring such a recent interaction domain, and to facilitate design and evaluation from both software engineering and ergonomics perspectives, is based on the fusion of two approaches: the ASUR notation and an ergonomic recommendations-based model. Both approaches are presented as well as the results of their fusion. The resulting model, an extension of the ASUR notation, is described as well as its limits and perspectives.

KEYWORDS: Mixed Systems, Domain model, Ergonomic recommendations, ASUR Notation.

INTRODUCTION

L'essor des technologies numériques (réseau sans fil,

miniaturisation des composants, etc.) a permis l'émergence de nouvelles techniques d'interaction où le monde physique et le monde numérique s'entremêlent. Divers courants de recherche sont apparus successivement : Réalité Augmentée (RA), interfaces tangibles, vidéo augmentée, Virtualité Augmentée (VA) et continuum RA-VA enfin. Nous avons choisi d'utiliser le terme de système mixte pour caractériser ces différentes approches. Les systèmes mixtes [10] regroupent deux grands types de systèmes interactifs fusionnant mondes physiques et numériques :

- Les systèmes de Réalité Augmentée, dont l'objectif est d'enrichir l'interaction d'un utilisateur avec le monde physique au moyen de données et services offerts par le monde numérique (l'ordinateur) ;
- Les systèmes de Virtualité Augmentée dont l'objectif est d'enrichir l'interaction d'un utilisateur avec le monde numérique, au moyen d'outils et d'actions du monde physique.

Autour de ces deux axes, la majorité des travaux de recherche a adopté une approche empirique, basée sur le développement de prototypes expérimentaux. Cela a, de manière indéniable, contribué à l'avancée de cette discipline émergente, en démontrant la faisabilité technique et logicielle de nouvelles techniques d'interaction et en créant de nouvelles situations d'interaction de plus en plus intégrées dans l'environnement de l'utilisateur. Les domaines d'application d'abord spécifiques (chirurgie, défense) se sont rapidement élargis jusqu'à des applications grand public (tourisme, culture, jeux).

Ce « passage à l'échelle » nécessite donc de factoriser les résultats de conception et de réalisation de ces systèmes, et d'accroître leur qualité logicielle et ergonomique. Il convient donc de structurer la conception et le développement des systèmes mixtes, c'est-à-dire de définir un processus de conception et de développement spécifique. Les approches classiques ne prennent pas suffisamment en compte les spécificités du monde

physique. Des approches plus récentes ouvrent des perspectives intéressantes : IRVO [8] centre la conception des systèmes mixtes sur la manipulation d'outils tandis que [16] adopte une approche basée sur les modèles. Mais, l'absence d'un véritable consensus quant à la définition du domaine des systèmes mixtes est l'inconvénient majeur de toutes ces tentatives.

En effet, le domaine des systèmes mixtes étant intrinsèquement pluridisciplinaire (GL, IHM, architecture, ergonomie, etc.), il convient avant tout d'identifier clairement les concepts impliqués. Définir un modèle de domaine apparaît donc comme un pré-requis incontournable pour permettre aux différentes disciplines impliquées de collaborer efficacement dans un processus de conception.

Aussi, en combinant la notation ASUR [10], reconnue pour la RA, et une liste des éléments constitutifs des Environnements Virtuels (EV) [4] basées sur l'analyse de recommandations ergonomiques, nous présentons dans cet article un modèle préliminaire du domaine des systèmes mixtes. Nous présentons tout d'abord la notation ASUR ainsi que la liste constitutive des EV. Puis nous présentons la fusion de ces deux approches, c'est-à-dire le modèle préliminaire.

LA NOTATION ASUR

La notation ASUR a été développée pour décrire les différentes facettes de l'interaction d'un utilisateur avec un système mixte et faciliter l'exploration des solutions permettant de fusionner les mondes physiques et numériques. Cette notation s'appuie sur 1) la mise en évidence des entités physiques et numériques requises pour réaliser une tâche particulière à l'aide du système, 2) l'identification des liens entre ces différentes entités et 3) la caractérisation de ces entités et liens.

Principes d'ASUR

Sur la base d'un scénario simple mais concret, la section suivante illustre les principaux aspects de la notation. La notation est plus largement présentée et illustrée dans [10].

Un musée augmenté. L'augmentation du musée se traduit par l'affichage de données relatives à l'œuvre d'art devant laquelle se trouve le visiteur. Cet affichage doit se réaliser sur un dispositif porté par l'utilisateur. Toutes les informations relatives aux œuvres d'art sont stockées dans une base de données, et l'utilisateur est connecté au système en entrant dans le musée. Enfin, le musée dispose d'un système de localisation.

Composants ASUR. Décrire avec ASUR une situation d'interaction repose sur l'identification des entités physiques ou numériques mises en œuvre lors de la réalisation de la tâche. Il existe quatre types de composants dans la notation ASUR : les

Adaptateurs (**A**), le Système informatique (**S**), l'Utilisateur (**U**) et les entités Réelles (**R**).

Le **composant S** représente le système informatique sous-jacent, y compris les capacités de traitements (noyau fonctionnel), de stockage, d'acquisition et de rendu de données. Dans le cas du musée augmenté, la base de données est incluse dans ce composant. Le **composant U** dénote l'utilisateur du système interactif mixte. Il s'agit ici du visiteur. Le **composant R** dépeint une entité physique manipulée au cours de la tâche. Deux formes de composants R co-existent : une entité physique joue soit le rôle d'un outil (R_{Tool}) concourant à la réalisation de la tâche, soit celui d'objet de la tâche (R_{Object}), c'est-à-dire d'entité sur laquelle porte la tâche. Dans l'exemple du musée, chaque œuvre d'art constitue un objet de la tâche. Enfin, le **composant A** symbolise un adaptateur, seule entité capable de faire transiter des données entre les mondes physiques et numériques. Nous distinguons donc les adaptateurs en entrée (A_{In}), transférant des données du monde physique vers le monde numérique, des adaptateurs en sortie (A_{Out}), qui portent les données du monde numériques vers le monde physique. Dans le cas du musée, les adaptateurs en entrée sont les deux systèmes de localisation requis pour connaître la position des œuvres et celle du visiteur. Un seul adaptateur en sortie est requis, celui chargé de l'affichage des données relatives à l'œuvre d'art (PDA, Tablette, casque, etc.).

Ces composants ne sont pas totalement autonomes et nécessitent d'échanger des données au cours de la réalisation de la tâche. Le concept des relations ASUR permet de représenter ces échanges de données.

Relations ASUR. Les échanges de données entre ces composants au cours de la réalisation de la tâche se traduisent dans ASUR par trois types de relations : échanges de données, proximités physiques, déclenchements.

Un échange de données ($A \rightarrow B$), traduit la capacité offerte au composant B de percevoir des données portée par le composant A. Par exemple, le visiteur perçoit l'œuvre d'art ($R_{Object} \rightarrow U$) et des données complémentaires sur son PDA ($A_{Out} \rightarrow U$). L'œuvre et le visiteur sont suivis par des localisateurs ($R_{Object} \rightarrow A_{In1}$, $U \rightarrow A_{In2}$), qui transmettent les positions au système informatique ($A_{In1} \rightarrow S$, $A_{In2} \rightarrow S$). Après traitements, le système met à jour les données affichées sur le PDA ($S \rightarrow A_{Out}$). **Une proximité physique ($A == B$),** traduit le fait que A est contre B, inclus dans B, tenu par B, etc. D'après le scénario du musée, le dispositif d'affichage est porté par l'utilisateur ($A_{Out} == U$). Enfin, **un déclenchement ($A \Leftrightarrow B$)** est toujours lié à un échange de données ($C \rightarrow D$) et traduit qu'un échange de données entre C et D ne se produira que sous une certaine condition spatiale impliquant A et B. Par exemple, le

passage d'un visiteur, porteur d'un active badge, devant une œuvre d'art ($U \rightarrow R_{\text{Object}}$), déclencherait le transfert de données entre l'œuvre et un localisateur ($R_{\text{Object}} \rightarrow A_{\text{In}}$).

Caractéristiques ASUR. La Figure 1 résume les composants et relations ASUR mis en œuvre dans le musée augmenté. Plusieurs dispositifs candidats sont alors envisageables : par exemple, l'adaptateur de sortie pourrait être un casque semi-transparent (HMD) ou bien un PC de poche (PDA). Pourtant, superposer (HMD) ou juxtaposer (PDA) des données numériques et physiques, modifie l'utilisabilité du système. Aussi, les caractéristiques des composants et relations ASUR visent à affiner la description fournie par les diagrammes ASUR et constitue un ensemble d'aspects à prendre en compte lors de la conception d'un système mixte. Cet ensemble est basé sur des caractéristiques identifiées par des approches de conception de systèmes mixtes [2] [13] et des caractéristiques spécifiquement liées à la manipulation d'objets physiques.

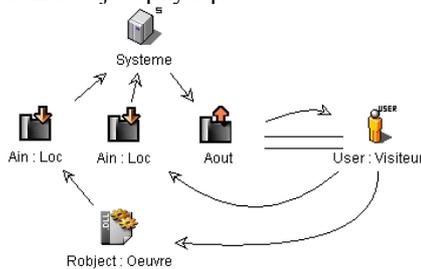


Figure 1: Description ASUR du scénario du musée augmenté.

Ainsi, le **lieu** où l'utilisateur doit porter son attention pour percevoir ou agir sur un composant constitue une première caractéristique suffisante pour différencier les deux solutions techniques envisagées ci-dessus (HMD ou PDA). Le **sens** de perception ou d'action requis pour percevoir ou transmettre une donnée à un composant, constitue une seconde caractéristique importante. Etudier la forme sous laquelle est exprimée la donnée fait apparaître quatre caractéristiques des échanges de données (\rightarrow): la **dimension** (1D,2D,3D), les **propriétés** [17] le **type** (graphique, texte, parole, etc.), et le **référentiel de présentation**. **Topologie**, **direction** et **métrique** sont les caractéristiques pertinentes pour décrire une proximité physique (\Rightarrow) [18]. Enfin la **condition** et le **transfert** déclenché caractérisent un déclenchement (\Leftrightarrow).

Apports et limitations d'ASUR

ASUR permet de décrire les différentes facettes de l'interaction d'un utilisateur avec un système interactif mêlant les mondes physiques et numériques. Cette notation constitue également un support au raisonnement en phase de conception. Enfin, en offrant une liste pertinente de caractéristiques et en suggérant pour chacune d'elles un ensemble possible de valeurs, ASUR constitue un outil pour l'exploration des solutions de conception possibles. Le rôle d'ASUR se manifeste donc principalement en phase de conception d'un système

[10], mais peut également guider le choix des variables d'une expérimentation [11].

Cependant, aucune méthode d'utilisation n'a été élaborée pour aider un concepteur à mettre en œuvre cette notation. De plus, le composant S apparaît comme une boîte noire agrégeant toutes les entités informatiques. Activer un menu ou faire un montage vidéo se traduit dans ASUR par une seule et même relation entre un adaptateur et le composant S. Les interfaces tangibles ne sont pas non plus aisément représentables avec la notation ASUR. La globalité du composant S constitue donc une limite importante à la notation ASUR. De ce fait, ASUR ne suffit pas pour établir un modèle de domaine des systèmes mixtes. L'affinement du composant S est donc requis et nous avons choisi de le baser sur un ensemble de recommandations ergonomiques [4] relatives aux E.V.

ELEMENTS CONSTITUTIFS D'UN E.V.

Motivations et principe de construction

Les premières motivations qui ont mené à la constitution de cette liste font écho à un manque de méthodes ergonomiques dédiées aux Interactions Homme-Environnement Virtuel (IHEV), permettant d'isoler des variables, d'effectuer des tests, de concevoir, de présenter, de recueillir, d'organiser et de structurer des résultats et des connaissances dans ce domaine. Pour répondre à cela, des travaux ont été entrepris pour adapter des méthodes ergonomiques existantes à la spécificité des EVs. Parmi les méthodes candidates à cette adaptation, nous avons choisi d'adapter les Critères Ergonomiques (C.E.) [5]. Pour y parvenir nous nous sommes appuyés sur une analyse approfondie de la littérature du domaine de l'IHEV, qui nous a permis de constituer une base des connaissances ergonomiques. Cette base était constituée à l'origine de divers types de connaissances, tels que comparaison de dispositifs, taxonomies, avis d'expert, résultats valides, qui ont été décryptées pour obtenir des recommandations ergonomiques selon un format standard. C'est à travers cette phase de décryptage, en plusieurs itérations, que nous avons affecté chaque recommandation (170 au total) à un C.E. et que nous avons identifié l'élément de l'EV sur lequel s'applique cette recommandation ; tous les éléments de la liste ont donc une justification en ce qu'ils sont issus de la littérature.

L'inventaire des ces éléments s'est donc réalisé de façon incrémentale, dans le sens où chaque nouvel élément identifié était ajouté à une liste. Cette liste a ensuite été structurée en suivant une logique d'interaction de façon à ce que chaque élément appartienne à une classe hiérarchique ou méta-élément. La liste ainsi obtenue est une structure préliminaire des éléments d'interface d'un EV, sur lesquels il est théoriquement possible d'appliquer un ou des C.E. adaptés aux IHEV's.

Liste des éléments identifiés

La liste complète des éléments constitutifs d'un EV est présentée Figure 2. Dans sa version originale [4] chaque élément est accompagné de(s) recommandation(s) ergonomique(s) associée(s) et d'exemples illustratifs. Par exemple, l'élément 1.5. *Morphologie de l'utilisateur* est associé à la recommandation suivante : *L'environnement virtuel doit être adapté à la taille de l'utilisateur, particulièrement lorsque l'interaction se fait via des dispositifs 3D*. Cette recommandation est elle-même illustrée par un contre exemple de cette recommandation, il présente le cas d'un EV qui n'est pas adapté à la morphologie des enfants et qui fait apparaître des menus à la hauteur d'un adulte, de ce fait les enfants ne peuvent pas y accéder facilement. Cette recommandation concerne bien l'élément *Morphologie de l'utilisateur* que l'on peut logiquement situer sous un méta-objet *Profil utilisateur* tout comme l'ensemble des objets de cette hiérarchie (*création des profils, gestion des profils...*) Il en est ainsi pour chacun des éléments de la liste.

1.Profil utilisateur	2.7.3.Dispositifs haptiques
1.1.Création de profil	2.7.4.Dispositifs audio
1.2.Gestion des profils	2.7.5.Dispositif de visualisation
1.3.Identification de l'utilisateur	2.7.5.1.Visiocasque
1.4.Utilisateur expert	2.7.5.2.Lunettes semi-transp.
1.5.Morphologie de l'utilisateur	2.7.5.3.Champ de vision
2.Objets représentés	2.7.6.Commande vocale
2.1.Généralités	2.7.7.Tâche de positionnement
2.1.1. Identification	3.Actions
2.1.2.Etat(s)	3.1.Disponibilité
2.1.3.Position – Orientation	3.2.Actions sur objets
2.1.4.Caractéristiques	3.3.Séquences d'actions
2.1.4.1.Structure – forme	3.4.Outils
2.1.4.2.Réalisme	4.Organisation spatiale de l'EV
2.1.4.3.Importance	5.Décor
2.1.4.4.Complexes – morcelés	6.Frontières
2.1.4.5.Objets abstraits	7.Eléments autonomes
2.2.Objets commandables	7.1.Avatar de l'utilisateur
2.2.1.Information sur l'objet	7.1.1.Options
2.2.2.Info. sur comp. de l'objet	7.1.2.Evolution des options
2.2.3.Identif. objets utiles à la tâche	7.1.3. Alignement avec cibles
2.2.4.Etats	7.1.4.Position
2.3.Objets d'aide à la navigation	7.1.5.Collaboration avec des pairs
2.3.1.Points de repère	7.2.Acteurs anthropomorphes
2.3.2.Position et orientation	8.Comportements de l'EV
2.3.3.Historique de navigation	8.1.Généralités
2.3.4.Info. sur le déplacement	8.2.Réalisme
2.3.5.Vitesse de déplacement	8.3.Statut Informationnel
2.3.6.Dédale	8.3.1.Prise de contrôle de l'interaction
2.3.7.Métaphore de déplacement	8.3.2.Fin Prise de contrôle de l'interaction
2.4.Objets 2D	8.3.3.Etat d'avancement de la tâche
2.5.Groupes d'objets	8.3.4.Evolution de variables
2.5.1.Attributs de sélection	8.4.Aide
2.6.Pointeur	8.4.1.Objets & Actions
2.6.1.Forme – état	8.4.2.Etapes
2.7.Dispositifs d'interaction	
2.7.1.Reconnaissance de geste	
2.7.2.Méthode de calibration	

Figure 2: Liste des éléments constitutifs d'un EV.

La liste des éléments constitutifs d'un EV comporte au total 73 éléments et méta-éléments. Cette liste présente 8 éléments principaux qui peuvent ou non se décomposer en éléments de niveau inférieur. Les éléments de niveau 1 qui se subdivisent sont : les *Objets représentés* (39 éléments hiérarchisés jusqu'à n-3), les *Comportements de l'EV* (10 éléments hiérarchisés jusqu'à n-2), les *Eléments autonomes* (7 éléments décomposés jusqu'à n-2), le *Profil utilisateur* (5 éléments décomposés jusqu'à n-1), les *Actions* (4 éléments décomposés à n-1.) Trois

éléments principaux ne sont pas décomposés, il s'agit de *Organisation spatiale de l'EV*, *Décor* et *Frontières*.

Intérêts et limitations

Il existe plusieurs intérêts à une démarche de classification de connaissances ergonomiques par critères et par objets. Ici on ne parlera pas des aspects définitionnels, validation et usages des C.E. [6]. On se limitera à un des aspects : les modèles d'objets du domaine (aussi appelé index). La démarche de construction et de validation de la liste décrite plus haut, suit celle d'autres index existant pour le Web [12], par exemple. L'utilisation d'index de ce type est utile dans plusieurs situations : utilisation pour des bases de données, des systèmes experts, lors d'inspections ergonomiques [9]... L'index qui nous concerne est utilisé, pour le moment, pour classer des recommandations ergonomiques et décrire un EV théorique. Il sera utilisé prochainement comme support à l'inspection ergonomique d'IHEV.

Les limitations de cette liste découlent de sa méthode de construction. Cette liste étant dédiée aux EVs sur la base de recommandations existantes, elle n'est donc pas exhaustive sur l'ensemble des éléments possibles constituant un EV finalisé. De plus les éléments identifiés varient en terme de précision tout comme les recommandations. Elle aborde essentiellement les aspects 3D numérisés, proches de la Réalité Virtuelle et Virtualité Augmentée. Tous les aspects du monde réel, que l'on peut rencontrer dans les Systèmes Mixtes ne sont donc pas intégrés à cette liste. Par contre, la notation ASUR prend en compte ces aspects, d'où l'intérêt de fusionner ces deux approches. Il serait ainsi possible de définir un modèle de domaine pour les Systèmes Mixtes, pouvant constituer un des éléments de réponses aux nombreux problèmes ergonomiques, que ceux-ci posent, notamment en ce qui concerne leur évaluation [3].

FUSION DES DEUX APPROCHES

Identifier les recouvrements, puis fusionner les deux approches constituent les deux étapes qui nous ont permis d'élaborer un modèle préliminaire de domaine pour les systèmes mixtes.

En exprimant les éléments de la liste dans les termes de la notation ASUR, il ressort que quelques éléments de la liste sont équivalents à des caractéristiques des composants A ou U, mais que la majorité de ces éléments ne peut être que traduite comme éléments ou caractéristiques du composant S de la notation ASUR. Ce composant représentant initialement le système informatique, il est certes cohérent que les éléments constitutifs d'un EV s'y retrouvent, mais cette opacité du composant S, ne favorise pas la conception d'un système mixte. C'est pourquoi nous avons choisi d'étendre la notation ASUR initiale, de façon à ce que les éléments identifiés dans la liste soient aisément discernables dans

la notation ASUR. Regrouper ces deux approches au sein de la notation ASUR constitue alors un outil de description de systèmes mixtes (RA ou VA).

Cette évolution de la notation ASUR touche essentiellement deux points de la notation initiale :

- Le composant S
- Les relations ASUR

Outre ces deux aspects, quelques caractéristiques ont également été ajoutées. Les 3 sections suivantes introduisent ces évolutions.

Affinement du composant S

Ce composant inclue nécessairement une "partie système". Elle regroupe le système d'exploitation, les couches logicielles nécessaires au fonctionnement du système, les drivers, les capacités de stockage, de rendu et de communication. Le noyau fonctionnel de l'application chargé des transformations des données, de l'interrogation de bases de données, etc. appartient également à cette première partie du composant S. Sans cette partie, l'application ne peut pas fonctionner. Ces différents éléments ne jouent qu'un rôle mineur au cours de la conception de l'interaction d'un utilisateur avec un système mixte. Par contre, les éléments à mettre en évidence et devant retenir l'attention du concepteur sont ceux qui portent l'interaction de l'utilisateur avec le système informatique. Or en IHM, il est classique de distinguer ce qui a trait à l'exécution de ce qui a trait à la perception. Souhaitant prendre en compte et exprimer cette distinction, nous introduisons donc deux nouveaux composants ASUR que nous nommons respectivement S_{Tool} et $S_{Presentation}$.

Le composant S_{Tool} . S_{Tool} représente une entité numérique dont l'activation entraîne une modification du comportement ou de l'apparence d'une autre entité numérique. L'ensemble des S_{Tool} représente donc les actions numériques qu'un utilisateur peut faire au cours de la réalisation de la tâche décrite par ASUR. Ainsi par exemple, un bouton permettant de déplacer un objet 3D ou le curseur représentant un pointeur sont des illustrations du composant S_{Tool} . De manière plus générale, le composant S_{Tool} regroupe les éléments numériques utiles à l'interaction en entrée (interacteur, pointeur, navigation).

Le composant $S_{Presentation}$. L'ensemble des $S_{Presentation}$ regroupe les objets du domaine, c'est-à-dire les concepts manipulés par le noyau fonctionnel et donc situés au cœur de l'interaction de l'utilisateur avec le système. Pour être perçus par l'utilisateur, un adaptateur de sortie est nécessaire. La liste des éléments constitutifs d'un EV nous a amené à distinguer deux types de ces composants : les S_{Object} et S_{Info} .

Le composant S_{Object} est le symétrique numérique du composant R_{Object} de la notation ASUR. Il constitue

l'objet de la tâche. La tâche engagée est donc située dans le monde numérique et relève donc de la virtualité augmentée. Dans un éditeur de texte, il s'agira par exemple du document électronique.

Le composant S_{Info} représente un des objets du domaine, pertinent pour la tâche en cours mais ne constituant pas la raison d'être de la tâche. Il concourt à garantir la propriété d'"observabilité" [1] en présentant à l'utilisateur des informations reflétant l'état interne du système. Il traduit donc une variable du domaine, ou rend perceptible une entité numérique représentant une entité physique, etc. Dans le cas de l'éditeur de texte, le nombre de pages et l'outil en cours d'utilisation constituent deux informations pertinentes à transmettre à l'utilisateur pour l'aider à maintenir une représentation mentale correcte de l'état interne du système. Ces deux informations constituent des composants S_{Info} .

De manière plus générale, les composants $S_{Presentation}$ sont donc des objets dont le rôle peut être d'apporter à l'utilisateur une information reflétant l'état interne du système, une aide ou un retour d'information lié à l'interaction en cours (ombrage). Il peut également s'agir de données périphériques à la tâche mais représentant un des objets du domaine tel que les frontières ou les décors du monde numérique dans lequel évolue l'utilisateur.

Le méta-composant S. Sans les capacités regroupées dans la "partie système" du composant S, les deux nouveaux types de composants du monde numérique n'ont aucune existence possible. Ils doivent donc être implicitement inclus dans un méta-composant contenant cette "partie système". Aussi, le composant S de la notation ASUR devient un méta-composant incluant d'une part une partie système, qu'il n'est pas pertinent de détailler pour la conception de l'interaction d'un utilisateur avec un système mixte, et d'autre part les éléments numériques support de l'interaction en entrée (S_{Tool}) et les objets du domaine ($S_{Presentation}$) qui sont de type S_{Object} ou S_{Info} .

Dans la notation ASUR, la notion de méta-composant numérique trouve en fait son reflet dans le monde physique. En effet, les entités physiques identifiées dans ASUR font plus largement partie du monde physique dans lequel des propriétés comme la gravité conditionnent le fonctionnement du monde physique. Cette "partie physique" du monde physique correspond donc exactement à la "partie système" du composant S et le monde physique pourrait être représenté par un méta-composant R incluant les composants U, R_{Tool} et R_{Object} . Pour ne pas surcharger les diagrammes ASUR, nous ne représenterons donc pas les méta-composants R et S mais uniquement les composants les constituant.

Nouvelles relations ASUR

Trois types de relations existent initialement dans la notation ASUR : les échanges de données, les proximités physiques, les actions physiques déclencheurs.

Les deux premiers types de relations restent pertinents pour exprimer des liens entre entités numériques. En effet, un transfert de données entre deux composants numériques ($A \rightarrow B$) se traduira, par ex., par un envoi de message. Une relation de proximité ($A \approx B$) traduira la proximité spatiale du rendu de ces entités numériques. En ce qui concerne les actions physiques déclencheurs, leur équivalent numérique relève des fonctionnalités couvertes par le noyau fonctionnel de l'application. La notion de "déclencheur" dans le monde physique n'apparaîtra donc pas dans la notation ASUR et sa modélisation reste à la charge des outils et notations de génie logiciel.

Par contre, initialement, les seuls liens ASUR existant entre le monde physique et le monde numérique représentaient les entrées/sorties du système, qui apparaissait comme une boîte noire. L'affinement de ce composant induit inévitablement des relations entre composants physiques et numériques par l'intermédiaire d'adaptateurs. Par ex., dans le système des mediaBlocks [17], la manipulation de briques physiques (R_{Tool}) permet de modifier l'enchaînement de séquences vidéo (S_{Object}). Un adaptateur d'entrée permet d'identifier chaque brique physique ainsi que sa position par rapport aux autres briques ($R_{Tool} \rightarrow A_{In}, A_{In} \rightarrow S_{Object}$). L'impact de l'interaction de l'utilisateur avec la brique physique sur l'objet numérique de la tâche est correctement décrit par ASUR.

Toutefois une association complémentaire existe entre la séquence vidéo numérique et la brique : la brique est la représentation physique de l'objet numérique. L'existence du lien, sa dimension statique ou dynamique et l'identification de la partie originale sont des aspects importants des systèmes mixtes [15] qui ne sont pas exprimables dans la notation ASUR initiale. Ce lien entre la brique et la séquence vidéo pouvant être dynamiquement établi au cours de l'interaction, il n'est pas envisageable d'ajouter une caractéristique au composant ASUR indiquant l'existence et la nature d'un lien avec un autre composant.

Aussi, nous ajoutons un type complémentaire de relation dans la notation ASUR. Représentée graphiquement par une flèche pointillée, la relation traduit le lien entre une entité physique et sa représentation numérique, ou inversement. Selon la tâche, les composants impliqués conservent donc les mêmes caractéristiques mais des liens peuvent être ajoutés pour traduire un couplage entre entité physique et entité numérique. Dans le cas des mediaBlocks, un tel lien relierait chaque brique physique à la séquence vidéo associée alors que sur un logiciel de montage classique, aucun lien de couplage ne serait établi entre la souris et les différentes séquences vidéo.

Aux modifications apportées aux deux premiers aspects de la notation ASUR (composants et relations), s'ajoutent des changements apportés au troisième aspect de la notation : les caractéristiques.

Ajout de caractéristiques

La prise en compte de la liste des éléments constitutifs d'un EV n'a pas mené à l'identification de nouvelles caractéristiques majeures pour les composants de la version initiale de la notation ASUR. En termes de recouvrement, aucun élément de la liste ne peut être mis en parallèle des caractéristiques des composants R. Par contre l'élément 2.7 (dispositif) de la liste est traduit par la caractéristique "sens de perception" des adaptateurs. De même les éléments 1.3 (identifiant), 1.4 (expert) et 1.5 (morphologie) sont équivalents aux caractéristiques Identifiant, Type et Morphologie des composants U de la notation ASUR.

En revanche, l'analyse de la liste nous a amenés à identifier deux caractéristiques principales pour les entités numériques S_{Tool} et $S_{Presentation}$. Ainsi, si par définition un composant S_{Tool} est commandable, un $S_{Presentation}$ ne l'est pas toujours. L'aspect commandable mis en évidence dans la liste constitue une des principales caractéristiques retenues. La seconde caractérise le rôle joué par le composant. L'analyse de la liste a permis de répertorier un ensemble de rôles possibles pour un ces deux composants :

- Le rôle rempli par un outil (S_{Tool}) est soit d'interagir en entrée pour agir sur un objet du domaine, soit de naviguer dans l'application.
- Le rôle rempli par un objet de présentation ($S_{Presentation}$) exprime sa raison d'être. Il peut donc s'agir d'un objet de la tâche, de données numériques illustrant un objet du domaine, d'éléments de retour d'information, d'aide ou de décor.

Les équivalences existant entre les composants S, S_{Tool} et $S_{Presentation}$ de la notation ASUR étendue et la liste sont résumées Figure 3.

En ce qui concerne les relations de la version initiale de la notation ASUR, aucune modification des caractéristiques ne s'est révélée nécessaire. La Figure 3 résume les éléments de la liste pouvant être exprimés par des caractéristiques des relation de type échange de données (\rightarrow). Les caractéristiques des autres relations initiales de la notation ASUR ne traduisent en revanche aucun des éléments identifiés dans la liste.

Par contre pour la nouvelle relation, représentant un lien entre une entité et sa représentation, nous identifions trois caractéristiques. Tout d'abord, comme introduit dans [15], il est nécessaire de pouvoir préciser si ce lien est établi de manière définitive ou s'il peut être modifié au cours de la réalisation de la tâche. Par ailleurs, le lien

Composant S	Élément de la liste	Composant $S_{Presentation}$	Élément de la liste	Relation \rightarrow	Élément de la liste 3.2 : Action sur objet
Identifiant	2.1.1 : Identifiant	Identifiant	2.1.1 : Identifiant	Identifiant	
Etat	2.1.2 : Etat	Type : S_{visuel} ou S_{info}		Composant source	
Localisation		Nature	2.1.4.1 : Structure 2.1.4.4' : complexe 2.5 : Abstrait	Composant destinataire	
Composant S_{Tool}	Élément de la liste	Commandable ou non	2.2 : Commandable	Poids	2.1.4.3 : Importance
Identifiant	2.1.1 : Identifiant	Dimension		Réf. de prés.	2.1.3 : Pos. et orient.
Nature	2.1.4.1 : Structure 2.1.4.4' : Complexe 2.5 : Abstrait	Rôle :		Langage :	
Dimension		Objet de la tâche		Dimension	
Rôle :		Décor, frontières	5,6 : Décor, Bords	Type	
Navigation		Aide	2.3.1 : Pt de repère 2.3.2 : Pos. et orient. 8.4 : Aide	Arbitraire / non	2.1.4.5 : Objet abstrait 2.3.7 : Métaphore de déplacement
Interacteur d'entrée	2.6 : Pointeur	Donnée numérique	2.4 : Objets 2D 7 : Éléments autonomes	Statique / non	
		Feedback d'interact°	8.3 : Statut informationnel	Linguist. / non	
				Analog. / non	2.1.4.2 : Réalisme

Relation $--->$	Élément de la liste
Identifiant	
Composant source	
Composant destinataire	
Lien définitif / modifiable	2.2 : Commandable
Comportement analog / non	
Rendu analog / non	

Figure 3 : Liens entre les caractéristiques des composants S , S_{Tool} , $S_{Presentation}$ et les éléments de la liste (gauche), et entre les caractéristiques des relations ASUR de type échange de données et lien de représentation et les éléments de la liste (droite).

existe entre deux entités, dont l'une est la représentation de l'autre. Il est donc pertinent de caractériser l'analogie entre l'entité originale et sa représentation. En nous inspirant des deux gouffres de Norman [14], nous proposons de caractériser cette analogie en termes de rendu et de comportement. Ainsi le cube manipulé par l'utilisateur de la CubicMouse a un comportement analogique au cube de données affiché. Il y a également analogie en termes de rendu puisque les données affichées sont incluses dans un cube. Par contre dans le cas des mediaBlocks, il y a analogie en termes de comportement, mais pas en termes de rendu : pour cela, il faudrait par exemple coller sur la brique physique une image résumant la séquence vidéo associée. Ces deux caractéristiques constituent finalement une extension au domaine des systèmes mixtes de la propriété nommée "Reproduction Fidelity" introduite par Milgram [13]. La Figure 3 résume ces caractéristiques.

Limites de la fusion

La fusion des deux approches a donc conduit à une extension de la notation ASUR, qui constitue désormais un modèle préliminaire de domaine pour les systèmes mixtes. Les éléments de la liste trouvent donc maintenant un équivalent dans la notation ASUR. Néanmoins, certains éléments de la liste n'ont pas été pris en compte dans l'extension d'ASUR.

Les premiers éléments non pris en compte sont les méthodes de calibration (2.7.2), les tâches de positionnement (2.7.7) et les séquences d'actions (3.3) qui font intervenir la **notion de dynamique**. Or la notation ASUR a été initialement conçue pour décrire l'interaction d'un utilisateur lors de la réalisation d'une tâche particulière. Une tâche sera donc décrite par un diagramme ASUR complet, et non par un ensemble de caractéristiques ASUR, et les enchaînements temporels devront être exprimés par une autre notation.

Les notions d'historique de navigation (2.3.3), d'informations sur le déplacement (2.3.4) et de dédale (2.3.6) n'ont pas non plus d'équivalent direct dans le modèle de domaine établi car ces trois éléments sont des **fonctionnalités** offertes par le système interactif mais spécifique à la tâche en cours. La notion de dédale

apparaîtra dans un diagramme ASUR par de multiples relations à destination de l'utilisateur et portant des données relatives au même concept. Quant aux historiques, ils se construisent au fur et à mesure de la réalisation de la tâche. Comme expliqué précédemment, cet aspect ne peut pas être exprimé dans la notation ASUR. Plusieurs éléments reflètent aussi des **capacités** offertes par le système (profil -1.1, 1.2-, vitesse de déplacement -2.3.5-, disponibilité -3.1-, outil -3.4). Le modèle de domaine n'intègre pas ces dimensions car utiliser ces services implique la réalisation d'une tâche particulière modélisable avec ASUR.

Enfin, le modèle de domaine n'intègre pas spécifiquement l'élément 4 : organisation spatiale de l'EV. Le seul aspect d'ASUR participant à l'expression de cet élément est la relation de type proximité physique (\Rightarrow). Il s'avère en fait que décrire l'organisation spatiale d'un EV est un problème similaire à la description de l'organisation spatiale du monde physique et ASUR ne dispose d'aucun élément suffisamment satisfaisant pour traiter cet aspect.

Ces trois points de non intégration complète des éléments de la liste dans le modèle de domaine pour les systèmes mixtes soulèvent un ensemble de perspectives que nous abordons dans la section suivante.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

L'approche retenue pour constituer un modèle de domaine est originale et complémentaire : originale car elle consiste à s'appuyer sur des résultats d'ergonomie pour étendre une notation de conception ; complémentaire car des résultats ergonomiques, utilisés habituellement a posteriori, sont ici réinjectés dans une méthode à utiliser a priori. Grâce à l'extension d'ASUR, il est désormais possible de décrire l'interaction d'un utilisateur avec un système de VA. L'ensemble des concepts du domaine, point clé des méthodes de conception de l'IHM, est désormais matérialisé dans la notation ASUR par l'ensemble des composants de types R_{Tool} et R_{Object} pour les concepts physiques, et S_{Tool} et $S_{Presentation}$ pour les concepts numériques. ASUR constitue alors un support pour la conception d'un système interactif mixte.

Ce modèle de domaine n'est qu'un modèle préliminaire qu'il conviendra d'éprouver et de compléter. Parmi les principales perspectives, se trouve l'étude du couplage du modèle de domaine avec un modèle de tâche. Ceci permettrait d'ajouter une dimension dynamique au modèle proposé ici.

Par ailleurs, le lien de couplage du modèle de domaine permet de représenter le niveau de fusion des mondes physiques et numériques. Le but du concepteur d'IHM étant de minimiser l'écart entre un concept et sa représentation, nous étudierons l'impact des différentes caractéristiques des liens de couplage sur la qualité de la fusion des deux mondes perçue par l'utilisateur. Nous approfondirons également l'influence du nombre des intermédiaires entre la version originale d'une entité et sa représentation sur l'interaction de l'utilisateur. Plus généralement, nos prochains travaux consisteront à identifier les situations d'interaction, c'est-à-dire des ensembles de composants et de relations ASUR avec des caractéristiques ASUR particulières, facilitant l'association d'un élément physique (resp. numérique) avec sa représentation numérique (resp. physique). Ces résultats constitueront alors des styles d'interaction favorisant l'utilisabilité d'un système mixte. Sur la base de ces résultats, il sera ensuite possible d'en déduire des patrons de conception, qui pourront être réutilisés dans le processus de conception d'autres systèmes.

A la différence de la notation IRVO, ASUR n'a pas été utilisée pour des situations multi-sites ou multi-utilisateurs, ni sur des systèmes répartis. Pour de telles situations, les concepts de méta-composant R et S mis en lumière dans cet article pourront sans doute servir de point de départ à la description de ces situations.

REMERCIEMENTS

Ces travaux ont été en partie soutenus par le CNRS du 21/07/03 au 31/12/03, dans le cadre du financement de 12 mois notifié pour l'Action Spécifique 153 du RTP16.

BIBLIOGRAPHIE

1. Abowd, G., Coutaz, J., Nigay, L., "Structuring the Space of Interactive Properties", Acte de EHCI'92, (1992), p. 113-128.
2. Azuma, R. T., "A survey of Augmented Reality.", dans la revue Presence: Teleoperators and Virtual Environments 6, 4, (1997), p.355-385
3. C. Bach, D. L. Scapin. "Obstacles and Perspectives for Evaluating Mixed Reality Systems Usability", Acte du Workshop MIXER, IUI-CADUT'04, (2004).
4. Bach, C. et Scapin, D.L., "Recommandations ergonomiques pour l'inspection d'environnements virtuels", Rapport COMEDIA, INRIA (2003).

5. Bach, C. Scapin D. L., "Adaptation des Critères Ergonomiques aux Interactions Homme Environnement Virtuel", Acte de IHM'03, (2003), p. 24-31.
6. Bastien, J. M. C., Scapin, D. L., "Évaluation des systèmes d'information et Critères Ergonomiques.", dans Systèmes d'information et Interactions homme-machine, C. Kolski (Ed.), Hermès. (2001).
7. Bernsen, O., "Foundations of multimodal representations. A taxonomy of representational modalities", dans Interacting With Computers, Vol. 6, 4, (1994), p. 347-371.
8. Chalon, R., David, B. T., "IRVO: an Architectural Model for Collaborative Interaction in Mixed Reality Environments", Acte du Workshop MIXER, IUI-CADUT'04, (2004), p. 35-42
9. Cybis, W., Scapin, D. L., Andres, D. P., Morandini, M., "ErgoCoIn: a usability inspection tool for web sites evaluation", Rapport Convention CNPq-INRIA, (2002), Project TVU-CECI.
10. Dubois, E., Gray, P.D., Nigay, L., "ASUR++: a Design Notation for Mobile Mixed Systems", dans Interacting With Computers, Vol.15,(2003),p.497-520
11. Dubois, E., Porcher Nedel, L., Dal Sasso Freitas, C.M., Jacon Jacob, L., "Beyond User Experimentation: Notational-based Systematic Evaluation of Interaction Techniques in Virtual Reality Environments", à paraître : revue Virtual Reality, (2004).
12. Leulier, C., Bastien, J. M. C., & Scapin, D. L., "Compilation of ergonomic guidelines for the design and evaluation of Web sites", Commerce & Interaction Report, INRIA (1998).
13. Milgram, P., Kishino, F., "A Taxonomy of Mixed Reality Visual Displays", Transactions on Information Systems, E77D12,(1994), p.1321-1329.
14. Norman, D., "Cognitive Engineering", In User Centered System Design, New Perspectives on Human-Computer Interaction, Lawrence Erlbaum Associates, (1986),p.31-61.
15. Renevier, P., Nigay, L., Bouchet, J., Pasqualetti, L., "Generic Interaction Techniques for Mobile Collaborative Mixed Reality Systems", Acte du Workshop MIXER, IUI-CADUT'04, (2004), p.6-11.
16. Trevisan, D., Vanderdonckt, J. Macq, B., "Model-Based Approach and Augmented Reality Systems", Acte de HCI International'03, (2003).
17. Ullmer, B., Ishii, H., mediaBlocks: Tangible Interfaces for Online Media, dans le vol. II des actes de CHI'99, USA, (1999), p.31-32.
18. Vazirgiannis, M., Theodoridis, Y., Sellis, T., "Spatio-temporal composition and indexing for large multimedia applications", dans Multimedia Systems n°6, (1998), Springer-Verlag, p.284-298.