

Interagir avec un objet mixte : Propriétés physique et numérique

Céline Coutrix, Laurence Nigay

Laboratoire d'Informatique de Grenoble
385, rue de la Bibliothèque
B.P. 53
38041 Grenoble Cedex 9, France
{Celine.Coutrix, Laurence.Nigay}@imag.fr

RESUME

Les systèmes mixtes visent à mêler les mondes physique et numérique. Dans ce contexte, le modèle d'interaction mixte permet de définir un objet mixte et l'interaction avec un tel objet au sein d'un système mixte. Nous affirons notre définition d'un objet mixte en identifiant des caractéristiques et en capitalisant des résultats de la littérature. Nous exploitons ces caractéristiques pour comparer les systèmes mixtes plus finement que les taxonomies existantes. Notre espace de caractérisation d'un objet mixte comprend deux volets complémentaires : nous analysons d'abord un objet mixte indépendamment de son contexte interactionnel, pour définir des caractéristiques dites intrinsèques à l'objet, puis nous considérons l'objet mixte au sein de l'interaction pour en identifier des caractéristiques extrinsèques. Nous illustrons notre propos en utilisant plusieurs systèmes mixtes de la littérature ou développés par l'équipe.

MOTS CLES : Système mixte, Interface augmentée, Réalité/Virtualité augmentée, Couplage Physique-Numérique, Modalité de Liaison, Multimodalité, Modèle d'interaction.

ABSTRACT

Mixed systems aim at merging the physical and digital worlds. In this context, the Mixed Interaction Model allows us to define a mixed object and the interaction with such an object. In this paper we further define a mixed object by identifying new characteristics and by reusing results from the literature. Such characteristics of an object are useful for comparing existing mixed systems at a fine-grain level. Our characterization space is made of two complementary facets: we first define intrinsic characteristics of an object as well as extrinsic characteris-

tics of a mixed object by considering its role in the interaction. These characteristics are discussed and illustrated in the context of different mixed systems from the literature or developed in our research team.

CATEGORIES AND SUBJECT DESCRIPTORS: D.2.2 [Software Engineering]: Design Tools and Techniques - User interfaces. H.5.2 [Information Interfaces And Presentation] User Interfaces - Graphical user interfaces, Interaction styles, User-centered design. I.3.6 [Computer Graphics] Methodology and Techniques - Interaction techniques.

GENERAL TERMS: Design, Theory

KEYWORDS: Mixed system, Augmented Interface, Augmented Reality-Virtuality, Physical-Digital Coupling, Linking Modality, Multimodality, Interaction Model.

INTRODUCTION

Les systèmes mixtes visent à mêler les mondes physique et numérique. Bien que de nombreux systèmes aient été développés, nous n'avons toujours pas une compréhension suffisante de ces systèmes et des objets mixtes qui les constituent, afin de les comparer et de capitaliser les expériences. Nous partons du modèle d'interaction mixte [10] et nous en affinons le pouvoir taxonomique. Plutôt que de présenter une nouvelle taxonomie qui n'améliorerait pas la lisibilité du domaine, nous capitalisons les recherches existantes au sein de ce modèle :

- Nous encapsulons des travaux existants au sein du modèle en considérant des caractéristiques, afin de situer ces travaux au sein d'un cadre de travail cohérent et unificateur.
- Nous identifions des recoupements entre les différents travaux existants, afin de contribuer à une meilleure compréhension du domaine.
- Nous identifions de nouvelles caractéristiques ouvrant des possibilités d'exploration des systèmes mixtes.
- Enfin, nous affinons aussi les taxonomies existantes afin de préciser la connaissance des systèmes mixtes.

Une taxonomie est un ensemble de critères qui permet de distinguer les systèmes mixtes, d'où son intérêt à la fois pour l'analyse des différences entre systèmes existants mais aussi pour la conception : les critères permettent de choisir entre différentes options de conception. Notre taxonomie focalise sur les objets mixtes prenant part à l'interaction au sein d'un système. Dans cet article, nous présentons des caractéristiques des objets mixtes comme critères taxinomiques en montrant comment ils permettent de distinguer les objets mixtes existants. Pourtant, comme ces critères sont amenés à être utiles pour la conception, nous les avons réunis en deux classes de caractéristiques qui prennent leur sens pour la conception : les caractéristiques intrinsèques et extrinsèques. Ces deux ensembles de caractéristiques permettent aux concepteurs d'étudier la réutilisabilité de leur choix pour des contextes applicatifs différents : les caractéristiques intrinsèques restent inchangées d'un contexte à l'autre, alors que les caractéristiques extrinsèques changent. Dans cet article, nous rappelons la définition d'un objet mixte issue de notre modèle d'interaction mixte, puis nous étudions les caractéristiques intrinsèques d'un objet. Considérant le rôle d'un objet au sein de l'interaction, nous présentons ensuite les caractéristiques extrinsèques d'un objet mis en contexte. Nous illustrons notre propos en utilisant plusieurs systèmes mixtes présentés dans le paragraphe suivant.

EXEMPLES ILLUSTRATIFS

Le système CASPER [12] (Computer ASisted PERicardial puncture) permet l'acquisition et la modélisation préopératoires de la région d'une effusion péricardique à partir de laquelle une trajectoire idéale de l'aiguille de ponction est planifiée. Pendant l'opération, le chirurgien est guidé grâce à un localisateur optique qui capture la position de l'aiguille en trois dimensions. La figure 1-(a) montre l'application pendant l'intervention (étape de guidage). Sur l'écran, la position et l'orientation de l'aiguille sont représentées par deux croix tandis qu'une croix fixe représente la trajectoire idéale (figure 1-(b)). Quand les trois croix sont superposées, la trajectoire de l'aiguille correspond à la trajectoire idéale.

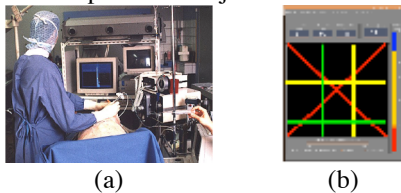


Figure 1 : Le système CASPER

Le DigitalDesk [25] est un des premiers systèmes mixtes et n'a été que partiellement développé. Nous considérons dans cet article le scénario de l'application de dessin. L'utilisateur dessine avec un crayon sur une feuille de papier placée sur une table équipée d'une caméra et d'un projecteur. Dans la figure 2-(a), l'utilisateur commence à dessiner des tuiles sur le toit de la maison. Il décide ensuite d'utiliser un bouton en papier où il est écrit « Fill »

(remplir) en le faisant pointer sur les tuiles du toit. Il appuie sur le bouton de papier, et cette action est capturée par la caméra. Le toit est alors rempli de tuiles, qui sont affichées sur la table grâce au projecteur. Le dessin résultant est donc composé de tuiles dessinées au crayon et de tuiles affichées grâce à un projecteur. Dans la figure 2-(b), l'utilisateur gomme les tuiles qui ne sont pas dessinées au crayon avec une gomme classique grâce à la caméra située au-dessus de la table : les tuiles gommées ne sont plus projetées sur la feuille.

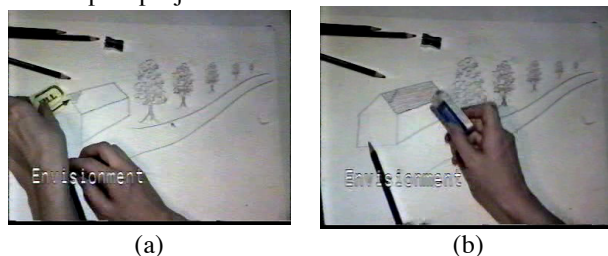


Figure 2 : Remplir le toit de tuiles et gommer avec le Digital-Desk

NavRna [2] est un système interactif pour la manipulation de molécules d'ARN. Comme le montre la figure 3, autour de la table équipée d'une caméra et d'un projecteur, les biologistes manipulent des jetons bleus dont les positions sont capturées par la caméra, pour explorer (déplacer, tourner, redimensionner) les molécules, représentées par un graphe projeté sur la table.



Figure 3 : NAVRNA

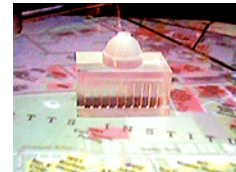


Figure 4 : Le Phicon en forme de dôme du MIT du Tangible Geospace [15]

Les Phicons sont des icônes physiques. Dans le Tangible Geospace [15] (figure 4) le phicon est un outil en forme de dôme du MIT, placé sur une table où est projetée une carte du campus. En déplaçant le phicon sur la table, l'utilisateur fait correspondre l'emplacement du Dôme sur la carte avec l'emplacement de l'outil.

L'IRPhicon [18] est un outil que l'utilisateur peut aussi déplacer. Il est équipé d'un émetteur infrarouge et est localisé par une caméra en noir et blanc.

Enfin l'Actuated WorkBench [21] est une table équipée d'aimants qui permettent au système de déplacer des objets notés « pucks ». L'utilisateur peut aussi déplacer un puck (mais pas en même temps que le système) soit directement en le prenant (figure 5), soit indirectement grâce à une trackball (figure 6).

Les systèmes mixtes présentés offrent à l'utilisateur la possibilité d'interagir avec des objets comme l'aiguille dans CASPER, le dessin dans le DigitalDesk, les jetons dans NAVRNA, un IRPhicon ou encore des objets aimantés de l'Actuated Workbench : tous sont des objets

mixtes. Afin d'en avoir une meilleure compréhension, nous présentons maintenant notre définition d'un objet mixte.

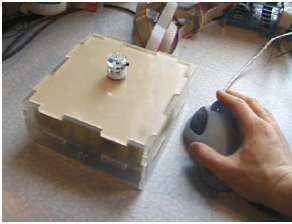


Figure 5 : L'Actuated Workbench [21]

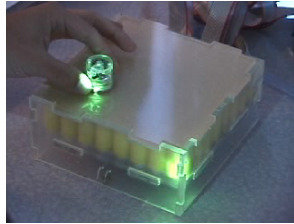


Figure 6 : L'Actuated Workbench [21] avec caméra et projecteur

DEFINITION D'UN OBJET MIXTE

Plusieurs travaux [9][15][23] s'accordent à dire qu'un objet mixte est composé d'une partie physique et d'une partie numérique. La partie physique de l'objet mixte est celle avec laquelle l'utilisateur, lui aussi dans le monde physique, interagit. La partie numérique de l'objet mixte est celle avec laquelle la machine peut interagir. Si la partie physique d'un objet est composée de propriétés physiques, comme le poids ou la couleur, et que la partie numérique d'un objet mixte est formée de propriétés numériques, comme un booléen ou une image numérique, alors nous définissons le lien entre ces deux ensembles de propriétés physiques et numériques par des modalités de liaison, comme le montre la figure 7. Pour définir ces modalités de liaison nous nous basons sur les deux niveaux d'abstraction de la définition d'une modalité d'interaction [24] comme un couple (*dispositif, langage*) noté (d, l). Le dispositif acquiert ou délivre de l'information à partir ou vers le monde physique. Par exemple la caméra acquiert une image, ou encore le projecteur délivre une image dans le monde physique. Le langage est un ensemble d'expressions bien formées qui transmet de l'information. Nous utilisons le terme de modalité de *liaison* au niveau d'un objet, par opposition aux modalités d'*interaction* qui définissent l'interaction entre l'utilisateur et un système informatique. Comme le montre la figure 7, un objet mixte peut comporter deux types de modalités de liaison :

- En entrée, une modalité de liaison capte certaines propriétés physiques grâce au dispositif d_e et interprète ces données physiques captées grâce au langage l_e pour constituer une partie des propriétés numériques de l'objet mixte.
- En sortie, une modalité de liaison génère des données à partir des propriétés numériques de l'objet mixte, grâce au langage l_s et traduit ces données générées en propriétés physiques observables par l'utilisateur grâce au dispositif d_s .

Un objet mixte peut comporter une ou plusieurs modalités de liaison en entrée et/ou une ou plusieurs modalités de liaison en sortie. Par exemple, l'aiguille de CASPER modélisée à la figure 8 est un objet mixte dont l'image est captée de trois points de vue différents. Pour la com-

position des modalités de liaison, symbolisée par un triangle, nous réutilisons les propriétés CARE [24] (Complémentarité, Assignation, Redondance, Equivalence) issues de travaux sur l'interaction multimodale. La composition des modalités de liaison de l'aiguille de CASPER est un cas de composition du niveau articulatoire, donc du niveau des dispositifs, fournissant en entrée du langage trois images : elles sont alors interprétées pour trouver la position et l'orientation de l'aiguille. La composition peut aussi avoir lieu au niveau d'abstraction supérieur, i.e. au niveau des langages. En sortie, la modélisation de l'aiguille mixte de CASPER comporte une modalité de liaison dont le langage permet de transformer les propriétés numériques « position » et « orientation » en croix (figure 1-(b)) superposées à une croix de référence. Ces croix sont alors affichées sur un écran pour former une partie des propriétés physiques de l'aiguille.

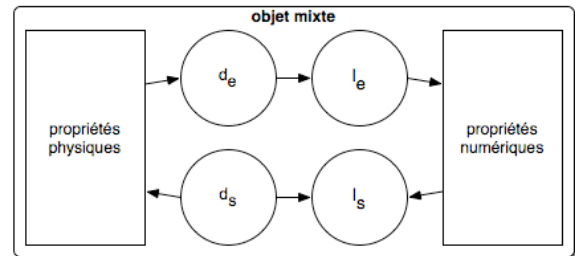


Figure 7 : Un objet mixte avec deux modalités de liaison entre ses propriétés physiques et numériques.

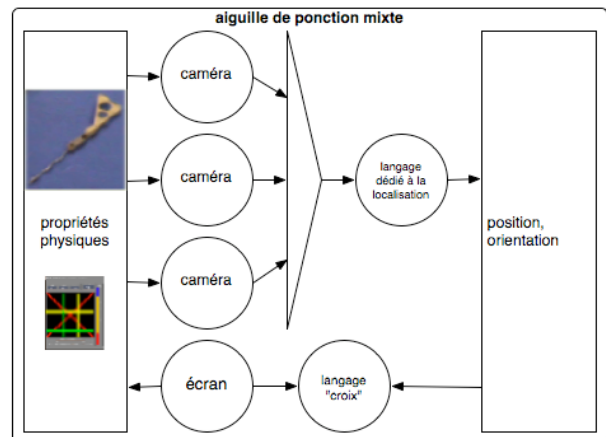


Figure 8 : L'aiguille de ponction mixte dans CASPER : exemple de modalités de liaison composées ou liaison multimodale.

Nous retrouvons les concepts, présentés dans [3], d'actions de l'utilisateur, de signaux captés, de syntaxe du langage d'interaction et de sa sémantique, appliqués à un niveau de granularité plus fin dans notre définition de l'objet mixte.

CARACTERISATION INTRINSEQUE D'UN OBJET MIXTE

À partir de la définition d'un objet mixte, nous identifions des caractéristiques qui appartiennent en propre à l'objet mixte et qui lui sont essentielles : ces caractéristiques sont intrinsèques car elles ne dépendent pas de cir-

constances extérieures. Nous présentons d'abord la caractérisation des modalités de liaison pour ensuite caractériser les propriétés physiques et numériques.

Caractéristiques des modalités de liaison d'un objet mixte

Notre définition d'un objet mixte est fondée sur le couple (dispositif, langage), déjà très étudié dans la littérature. Notre démarche étant de capitaliser l'existant, nous réutilisons les travaux liés aux dispositifs et aux langages. Ainsi les travaux sur les dispositifs d'interaction [7] [8] [17] [26] s'appliquent aux dispositifs des modalités de liaison d'un objet mixte. De même, les caractéristiques des langages d'interaction [6][24] permettent de distinguer les langages des modalités de liaison de plusieurs objets mixtes. Enfin, comme expliqué dans [11], il convient aussi d'étudier les caractéristiques des dispositifs et des langages au regard les unes des autres. Par exemple, est-ce que la précision de capture du dispositif n'est pas perdue par le langage ?

Nous réutilisons aussi les travaux sur la multimodalité [24] pour distinguer le type de composition de modalité grâce aux propriétés CARE [24] (les actions intégrales de [3] sont fusionnées par Complémentarité, Redondance, ou Équivalence et les actions séparables [3] ne le sont pas (Assignation)). Par exemple, nous pouvons remarquer immédiatement une différence entre la gomme du DigitalDesk et l'aiguille de CASPER en observant les deux modélisations des figures 10 et 8 : la seconde est multimodale en entrée, alors que la première ne l'est pas. Au sein d'un objet mixte, la caractérisation des modalités de liaison permet la réutilisation des travaux sur les dispositifs et langages des modalités et sur la multimodalité.

Caractéristiques des propriétés physiques d'un objet mixte

Nous considérons les propriétés physiques indépendamment des modalités de liaison. Quelle que soit la modalité choisie, les propriétés physiques peuvent être capturées en entrée, et/ou générées en sortie : il en découle un espace des possibilités structuré en quatre zones (figure 9). Reprenons les derniers exemples présentés, et considérons dans le tableau 1 l'exemple d'une propriété physique commune à ces objets d'interaction : la position. La position du *puck* de l'Actuated Workbench en configuration suivi par caméra (figure 6) est la seule à être générée en plus d'être capturée. Nous voyons dans cet exemple qu'étudier la position ne permet pas de faire la différence entre l'IRPhicon et NavRna, puisque dans les deux cas, la position est capturée mais non générée. Pour ce faire, considérons alors un autre exemple de propriété physique commune à ces objets : la couleur (tableau 2). Dans le cas de NavRna, la couleur est capturée par le système via la caméra et le langage qui reconnaît la position du jeton grâce à sa couleur. En revanche, la couleur n'est pas générée : il n'y a pas de retour d'information coloré projeté sur le jeton. Dans le cas de l'Actuated Workbench, au contraire, il y a un retour d'information

coloré projeté sur le *puck* pour rendre compte de la position capturée (figure 6). La couleur est donc générée, mais pas capturée, puisqu'il s'agit d'une caméra infra rouge. Dans le cas de l'IRPhicon, c'est aussi par infra rouge que la position de l'objet est capturée en entrée, et il n'y a pas non plus de couleur générée en sortie.

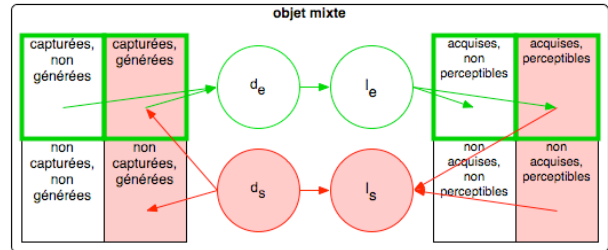


Figure 9 : Caractériser les propriétés physiques et numériques du point de vue des modalités de liaison.

Position	Générée	Non Générée
Capturée	Actuated Work-Bench	IR Phicon NavRna
Non Capturée		

Tableau 1 : Distinguer des objets d'interaction parmi les systèmes NavRna, Actuated WorkBench et IRPhicon en étudiant une de leurs propriétés physiques : la position dans le plan de la table.

Couleur	Générée	Non Générée
Capturée		NavRna
Non Capturée	Actuated Work-Bench	IRPhicon

Tableau 2 : Distinguer des objets d'interaction parmi les systèmes NavRna, Actuated WorkBench, et IRPhicon en étudiant une de leurs propriétés physiques : la couleur.

Caractériser les propriétés physiques permet donc de faire la différence entre les systèmes. L'apport des caractéristiques réside aussi dans l'aide à la conception : par exemple pour un concepteur qui n'aurait pas connaissance des technologies utilisées pour les modalités de liaison, certaines propriétés physiques devront être conçues en sachant si elles sont captées et/ou générées. Dans le cas de NavRna, il convient par exemple de spécifier au designer du jeton, l'ensemble des propriétés physiques captées, y compris la couleur, pour ne pas qu'il conçoive le jeton d'une autre couleur qui ne sera pas capturée par la modalité de liaison en entrée. De plus, pour la prise en compte de l'utilisateur lors de la conception, il convient de mettre en relation les propriétés physiques captées avec l'affordance perçue [20] des propriétés physiques.

Caractéristiques des propriétés numériques d'un objet mixte

De façon symétrique du côté du système, nous pouvons caractériser les propriétés numériques. Celles-ci peuvent être acquises à partir du monde physique, via la modalité de liaison en entrée et/ou perceptibles dans le monde physique, via la modalité de liaison en sortie (figure 9). Considérons l'exemple de la propriété numérique

« Position » des objets que nous venons de classer (tableau 3). Cette propriété numérique est un couple d'entier (x, y) dans tous les cas, sauf dans le cas de CASPER (figure 8), où la position est un triplet (x, y, z). Un premier cas est celui de l'Actuated WorkBench (figure 5), où la position n'est pas acquise : le *puck* n'a pas de modalité de liaison en entrée dans cette configuration sans caméra. Dans tous les autres cas, cette propriété numérique est acquise via une caméra. En revanche, le couple (x, y) n'est pas rendu perceptible dans le cas du jeton de NavRna, alors qu'il l'est pour l'Actuated WorkBench (sous forme de la position physique sur la table) et aussi pour CASPER (sous forme de croix). En phase de conception d'un objet, ce critère permet au concepteur de spécifier quelles propriétés numériques doivent être perceptibles, indépendamment de la forme qu'elles prendront via la modalité de liaison.

Position	Perceptible	Non Perceptible
Acquise	Actuated WorkBench (en configuration suivi par caméra) CASPER	NavRna
Non Acquise	Actuated WorkBench	

Tableau 3 : Distinguer des objets d'interaction parmi les systèmes NavRna, Actuated WorkBench et IRPhicon en étudiant une de leurs propriétés numériques : Position.

Cette caractérisation des propriétés physiques et numériques et des modalités de liaison d'un objet mixte affine une taxonomie existante [14] : en effet l'axe « Input & Output » [14] correspond aux informations qui transitent en entrée et en sortie du système. Nous affinons cet axe en étudiant les propriétés et les différents niveaux d'abstraction d'une modalité de liaison. Ainsi en phase de conception, le libre choix est laissé au concepteur de commencer son travail à n'importe quel niveau d'abstraction de l'objet mixte. Par exemple pour NavRna, le premier choix était la modalité de liaison en entrée (caméra, vision par ordinateur). Ce choix influe sur la couleur, propriété physique du jeton mixte. Si le concepteur avait commencé par choisir des jetons multicolores, il aurait choisi une autre modalité de liaison cohérente avec sa caractérisation des propriétés physiques.

En plus de permettre une caractérisation à plusieurs niveaux d'abstraction, les caractéristiques permettent de souligner qu'une même propriété physique peut être à la fois capturée et générée, comme la position de l'Actuated WorkBench en configuration suivi par caméra. Ce constat le différencie de CASPER, où la position est capturée, mais générée sous une autre forme (visuelle). C'est un cas de représentation multiple du même concept [1]. Dans le cas d'une propriété capturée et générée, en phase de conception il convient de se poser la question de la cohérence entre l'information captée du monde physique et celle fournie par le côté numérique : laquelle sera prioritaire ? Les concepteurs de l'Actuated

WorkBench ont résolu la question par l'utilisation d'un mode : l'objet est soit en mode vision, soit en mode actuation.

Caractéristiques du couplage entrée/sortie

Notre modèle des objets mixtes [10] intègre aussi une description du couplage temporel entre les modalités de liaison en entrée et en sortie, qui a été étudié dans [14]. Par exemple, dans l'Actuated Workbench, les deux modalités de liaison sont temporellement « découplées » afin de résoudre les problèmes de cohérence entre position capturée et générée.

Le couplage spatial entre les modalités de liaison a été étudié dans [12][13][14], sous les noms respectifs de « Continuité », « Embodiment », « Physical & Virtual Layers ». Dans l'exemple de CASPER, la modalité de sortie est responsable de l'affichage des croix sur l'écran : cet espace d'interaction ne coïncide pas spatialement avec l'espace d'interaction en entrée. Nous retrouvons aussi un espace de caractérisation spatiale dans [5]. L'aura est une caractérisation spatiale liée aux propriétés physiques de l'objet mixte. Elle désigne, pour chaque propriété physique, l'espace dans lequel on peut interagir en entrée ou en sortie avec cette propriété physique. Les deux sous-espaces correspondant à l'entrée et à la sortie sont le focus et le nimbus. Le focus désigne l'espace dans lequel on peut interagir en entrée avec l'objet, et le nimbus l'espace en sortie. Étudier le couplage spatial d'un objet revient à étudier si le focus et le nimbus d'un objet sont colocalisés. Nous appliquons donc ces travaux issus de la réalité virtuelle au sein de notre modèle, en mettant en évidence que toutes les propriétés physiques ne sont pas forcément générées par la machine. Nous avons donc étendu cette caractérisation spatiale dans [19] aux propriétés physiques non générées sous le nom de « cohérence » spatiale entre propriétés physiques générées et non générées.

Nous avons caractérisé l'objet mixte hors de son contexte applicatif. Nous présentons maintenant l'objet mixte dans son contexte d'interaction pour en identifier des caractéristiques extrinsèques.

PLACE D'UN OBJET MIXTE DANS L'INTERACTION

L'objet mixte présenté jusqu'ici est indépendant de son contexte d'utilisation, puisqu'on peut encore imaginer à ce stade plusieurs applications possibles avec un tel objet. Dans tous les exemples donnés de systèmes mixtes, l'utilisateur interagit avec l'objet dans un contexte d'interaction pour lequel l'objet a été créé. Le modèle d'interaction mixte décrit l'interaction entre l'utilisateur et les objets mixtes constituant un système informatique mixte [10]. La figure 10 présente le cas du DigitalDesk : l'utilisateur fait une action avec la gomme (outil mixte). Cette action sur les propriétés physiques de la gomme est capturée par la modalité de liaison en entrée de l'outil (*caméra, vision*) pour mettre à jour la position de la gomme dans le référentiel de la table. La modification des propriétés numériques de l'outil mixte entraîne la

traduction par le langage d'interaction de ces propriétés en tâche élémentaire : la position (x, y) se transforme en « supprimer la partie du dessin qui se trouve à la position (x, y) ». La tâche élémentaire s'applique ensuite aux propriétés numériques du dessin (objet de la tâche mixte). Une fois les modifications apportées aux propriétés numériques de l'objet de la tâche, celui-ci rend observable ce changement d'état interne grâce au retour d'information et à sa modalité de liaison en sortie : la forme qui vient d'être effacée n'est plus projetée sur la table. Sur le schéma de la figure 10, nous remarquons que l'outil mixte est le dispositif de la modalité d'interaction et qu'il est donc associé à un langage d'interaction.

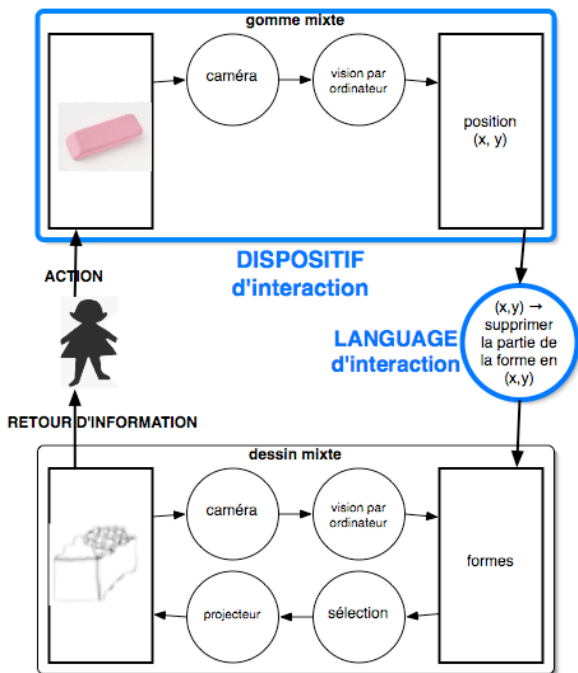


Figure 10: Interactions entre l'utilisateur, un outil mixte (la gomme), et un objet de la tâche mixte (le dessin) dans le cas du DigitalDesk.

Ce modèle reprend le modèle d'interaction instrumental [4] et l'enrichit de la notion de modalité d'interaction. Au sein de ce modèle, un objet mixte peut être caractérisé par ce qu'il reçoit de l'extérieur, de l'utilisateur et de l'application : nous présentons ces caractéristiques dites extrinsèques dans le paragraphe suivant.

CARACTERISATION EXTRINSEQUE D'UN OBJET MIXTE

Un objet mixte est d'abord distingué par son rôle [12] : l'utilisateur peut se servir de l'objet mixte comme d'un outil (la gomme de la figure 10), ou l'objet mixte peut être objet de la tâche de l'utilisateur (le dessin de la figure 10). Outre le rôle de l'objet, nous considérons la métaphore appliquée à l'objet, ainsi que ses ports d'entrée physiques et numériques.

Métaphore

Nous considérons les aspects de la métaphore définis dans [13]:

- La métaphore de nom est définie par la phrase « un $\langle X \rangle$ dans le système est comme un $\langle X \rangle$ dans le monde réel ».
- La métaphore de verbe est définie par la phrase « $\langle X \rangle$ -er l'objet dans le système est comme $\langle X \rangle$ -er dans le monde réel ».

Pour caractériser la métaphore appliquée à un objet mixte dans le contexte de son application, nous considérons les relations entre les propriétés (physiques et numériques) de l'objet mixte et la tâche accomplie.

Pour la métaphore de nom d'abord, nous étudions la façon dont les propriétés physiques reflètent la tâche accomplie avec l'objet mixte. Par exemple, nous considérons le phicon dans le système du Tangible Geospace [15] de la figure 4 qui a la forme du dôme du MIT : la forme représente donc un des paramètres de la tâche, puisqu'en déplaçant le phicon sur la table, l'utilisateur fait correspondre l'emplacement du dôme sur la carte avec l'emplacement de l'outil. Au contraire dans l'application NavRna de la figure 3, il n'y a pas de métaphore de nom, puisque le jeton bleu a une forme générique qui n'a pas de rapport avec le paramètre de la tâche. De plus, au lieu de considérer seulement le paramètre de la tâche, la métaphore de nom peut aussi mettre en rapport les propriétés physiques de l'objet mixte avec la tâche elle-même. Comme le montre la figure 11, les propriétés physiques de l'objet mixte représentent la tâche ou commande elle-même, au lieu du paramètre : par exemple dans le DigitalDesk, nous pouvons imaginer que placer une gomme sur le dessin de la maison efface cette maison.

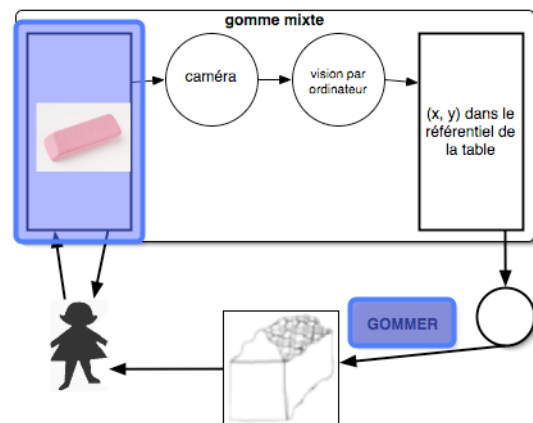


Figure 11 : Métaphore de nom: relation entre les propriétés physiques d'un objet mixte et la tâche.

Pour la métaphore de verbe, nous étudions comment les propriétés numériques reflètent la tâche accomplie avec l'objet mixte. En effet, les propriétés numériques qui sont acquises par la modalité de liaison correspondent à l'action faite par l'utilisateur et captée par la modalité de liaison de l'objet. Par exemple comme le schématise la figure 12, l'utilisateur peut utiliser un jeton de NavRna pour effacer une partie du graphe, en bougeant le jeton

de la même manière qu'on bouge une gomme dans le monde physique.

Les deux types de métaphore (nom et verbe) peuvent donc être étudiés grâce au modèle d'interaction mixte en considérant respectivement les propriétés physiques et numériques d'un objet mixte. Nous pouvons définir d'autres types de métaphores, au-delà des métaphores du monde physique. Par exemple, le bouton mixte « Fill » du DigitalDesk de la figure 2-(a) nous présente une situation analogue au monde numérique. De plus, comme expliqué dans [13], un objet mixte peut à la fois être caractérisé par une métaphore de nom et de verbe. C'est l'exemple du bouton « Fill » du DigitalDesk : Il ressemble à un bouton (métaphore de nom) et s'utilise comme un bouton (métaphore de verbe).

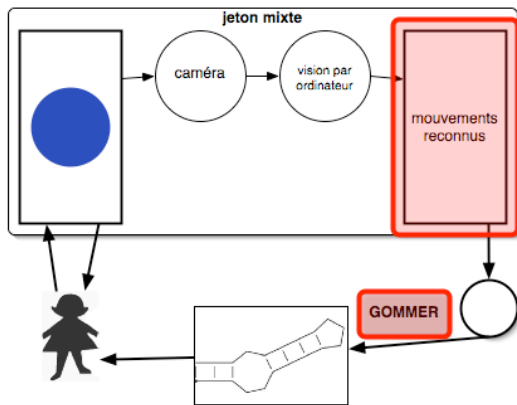


Figure 12 : Métaphore de verbe : relation entre les propriétés numériques d'un objet mixte et la tâche.

Ports d'entrées physiques et numériques d'un objet mixte

Dans [20], Norman définit l'affordance comme les propriétés actionnables entre l'utilisateur et le monde, c'est-à-dire l'ensemble des actions que l'utilisateur peut faire sur les propriétés physiques d'un objet mixte. Dans le contexte de l'application, certains états possibles des propriétés physiques peuvent être bloqués par l'extérieur de l'objet mixte.

De façon symétrique, certaines valeurs pour les propriétés numériques peuvent être bloquées par l'extérieur de l'objet mixte. En effet, les langages d'interaction peuvent contraindre les propriétés numériques.

Les ports d'entrée physiques et numériques d'un objet mixte sont donc définis là où ils n'existent pas de contraintes, comme l'illustrent les figures 13 et 14. Cette notion de port d'entrée d'un objet mixte dépasse les caractérisations de l'interaction selon les contraintes physiques de [16][22][23] en identifiant des ports d'entrée aussi du côté numérique.

Prenons l'exemple du système décrit dans [22] (figure 15). Il est basé sur la même table aimantée que l'Actuated Workbench, couplé avec une caméra et un projecteur. Le système calcule la position idéale des *pucks* sur la table, et la table aimantée les déplace vers cette position. L'utilisateur peut ajouter des contraintes telles qu'empêcher l'accès à une zone de la table (figure

15) ou bloquer la position du *puck* en posant un objet lourd dessus. Ceci permet à la fois d'utiliser les capacités de calcul de l'ordinateur et d'exprimer physiquement certaines contraintes.

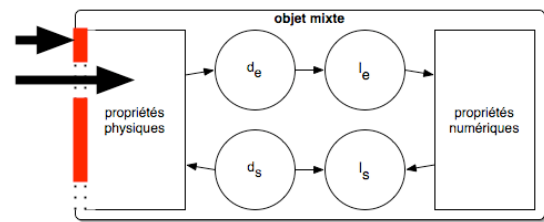


Figure 13 : Port d'entrée physique : les actions possibles sont celles qui ne sont pas bloquées par les contraintes physiques.

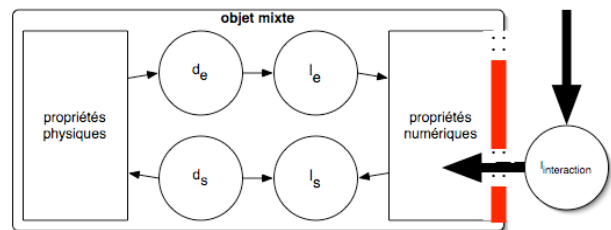


Figure 14 : Port d'entrée numérique : les actions possibles sont celles qui sont autorisées par le langage d'interaction.



Figure 15 : Contraindre physiquement le mouvement d'un *puck* dans l'Actuated Workbench[22].

Dans le cas de ce système [22], l'objet mixte *puck* a une modalité de liaison en entrée (*caméra, vision*), et deux en sortie avec la table aimantée et le projecteur.

- Parmi ses propriétés numériques, on trouve Position[2]. Comme schématisé à la figure 14, le langage d'interaction associé force la valeur de la propriété numérique Position[2] à une valeur [x0, y0] optimisée par le système. Le port d'entrée est donc restreint du côté numérique. Cette notion de port d'entrée numérique permet de distinguer le *puck* et le jeton de NavRna : aucun langage d'interaction ne permet de modifier la propriété numérique Position[2] du jeton.
- Du côté physique, les propriétés physiques autorisent un ensemble d'actions : par exemple, le *puck* incite à le prendre ou à le lancer en l'air puisqu'il est petit et léger. Or l'utilisateur ne peut pas le déplacer verticalement (en dessous de la table) car la table le bloque : ce port d'entrée physique est donc partiellement fermé par la table. De plus, il peut être encore réduit par l'ajout d'un objet physique comme la courbe de la figure 15, voire complètement bloqué quand les utilisateurs mettent un autre objet, lourd, sur le *puck* et l'empêche ainsi de bouger. Nous réutilisons dans no-

tre modèle la distinction de [22] entre d'une part les ports d'entrée physiques réduits pour fournir à la modalité de liaison en entrée des données exploitables par l'objet et le système et pallier ainsi aux limites technologiques (la table), et d'autre part les ports d'entrée réduits par intervention explicite de l'utilisateur (courbe de la figure 15). Ainsi on voit que les ports d'entrée physiques du *puck* sont différents des jetons ou des Phicons, puisque ces derniers ne sont pas contraints par autre chose que la table.

Les ports d'entrée nous permettent donc de caractériser les objets mixtes, de façon propre à chaque contexte d'interaction, comme leurs métaphores et leurs rôles.

CONCLUSION

Basé sur la définition d'un objet mixte de notre modèle d'interaction mixte, nous avons présenté des caractéristiques intrinsèques et extrinsèques d'un objet mixte qu'il soit outil ou objet de la tâche au sein d'un système interactif mixte. En montrant comment ces caractéristiques permettent de distinguer les systèmes mixtes existants, nous avons montré leur apport taxinomique. Plusieurs caractéristiques sont issues d'autres travaux et notre contribution réside aussi dans la capitalisation de ces travaux au sein d'un cadre de travail cohérent et unificateur.

Comme tous critères taxinomiques, ces caractéristiques sont aussi utiles en phase de conception. Nos travaux en cours concernent l'exploitation de ces caractéristiques en conception en focalisant sur le pouvoir génératif de notre modèle d'interaction mixte par application à la définition d'objets mixtes.

BIBLIOGRAPHIE

1. Abowd, Coutaz, Nigay, *Structuring the Space of Interactive System Properties*, EHCI'92, pp. 113-130.
2. Bailly, Nigay, Auber, *NAVRNA : Visualisation – Exploration – Edition of RNA*, AVI'06, pp. 504-507.
3. Baudel, *Aspects Morphologiques de l'Interaction Humain-Ordinateur: Étude de Modèles d'Interaction Gestuels*, Thèse de Doctorat, 1995.
4. Beaudoin-Lafon, *Designing Interaction, not Interfaces*, AVI'04, pp. 15-22.
5. Benford, Fahlén, *A Spatial Model of Interaction in Large Virtual Environments*, ECSCW'93.
6. Bernsen, *Taxonomy of HCI Systems: State of the Art*. ESPRIT BR GRACE, deliverable 2.1, 1993.
7. Buxton, *Lexical and pragmatic considerations of input structures*, Computer Graphics, 17 (1), pp. 31-37.1983.
8. Mackinlay, Card, Robertson, *A Semantic Analysis of the Design Space of Input Devices*, Human Computer Interaction, Lawrence Erlbaum, 5(2&3), pp. 145-190.
9. Chalon, *Réalité mixte et Travail Collaboratif : IR-VO, un modèle de l'interaction Homme-Machine*, Thèse de doctorat, 2004.
10. Coutrix, Nigay, *Mixed Reality: A Model of Mixed Interaction*, Proceedings of AVI'06, pp. 43-50.
11. Dubois, Gray, *A Design-Oriented Information-Flow Refinement of the ASUR Interaction Model*, EIS'07.
12. Dubois, Nigay, Troccaz, *Consistency in Augmented Reality Systems*, Proceedings of EHCI'01, pp. 117-130.
13. Fishkin, *A taxonomy for and analysis of tangible interfaces*. Personal Ubiquitous Computing, 8(5), pp. 347-358.
14. Fitzmaurice, Ishii, Buxton, *Bricks: Laying the foundations for Graspable User Interfaces*, CHI'95, 442-449.
15. Ishii, Ullmer, *Tangible Bits : Towards Seamless Interfaces between People, Bits and Atoms*, CHI'97, pp. 234-241.
16. Ullmer, Ishii, Jacob, *Token+constraint systems for tangible interaction with digital information*, ACM TOCHI, 12 (1), p.81-118.
17. Milgram, Kishino, *A taxonomy of mixed reality visual displays*, IEICE Transactions on Information Systems, E77-D(12).
18. Moore, Want, Harrison, Gujar, Fishkin, *Implementing Phicons: Combining Computer Vision with InfraRed Technology for Interactive Physical Icons*, UIST'99, pp. 67-68.
19. Nigay, Coutrix, Renevier, *Systèmes Interactifs Mixtes : Fusion des mondes physique et numérique*. Interfaces numériques, Hermes, à paraître.
20. Norman, *Affordance, Conventions and Design*. Interactions, 6(3), pp. 38-43.
21. Pangaro, Maynes-Aminzade, Ishii, *The Actuated Workbench: Computer-Controlled Actuation in Tabletop Tangible Interfaces*, UIST'02, pp.181-190.
22. Patten, Ishii, *Mechanical Constraints as Computational Constraints in Tabletop Tangible Interfaces*, CHI'07, pp. 809-818.
23. Shaer, Leland, Calvillo, Jacob, *The TAC Paradigm: Specifying Tangible User Interfaces*, Personal and Ubiquitous Computing, 8(5), pp. 359-369.
24. Vernier, Nigay, *A Framework for the Combination and Characterization of Output Modalities*. DSVI-S'00, pp. 32-48.
25. Wellner, *Interacting with Paper on the DigitalDesk*, CACM, 36(7), pp. 87-96.
26. Zhai, *Human Performance in 6 DOF Input Control*, Thèse de Doctorat, 1995.