

Interaction Tangible sur Table, un cadre fédérateur illustré

Sophie Lepreux, Julien Castet, Nadine Couture, Emmanuel Dubois, Christophe Kolski, Sebastien Kubicki, Valérie Maquil, Guillaume Riviere

► **To cite this version:**

Sophie Lepreux, Julien Castet, Nadine Couture, Emmanuel Dubois, Christophe Kolski, et al.. Interaction Tangible sur Table, un cadre fédérateur illustré. Journal d'Interaction Personne-Système, Association Francophone d'Interaction Homme-Machine (AFIHM), 2017, 5 (1), pp.23 - 59. hal-01578894

HAL Id: hal-01578894

<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01578894>

Submitted on 29 Aug 2017

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.

Interaction Tangible sur Table, un cadre fédérateur illustré

Sophie LEPREUX

LAMIH, UMR UVHC CNRS 8201,
Valenciennes

Sophie.lepreux@univ-valenciennes.fr

Julien CASTET

Immersion

Nadine COUTURE

Estia, LaBRI UMR 5800

Emmanuel DUBOIS

Université Toulouse & CNRS,
IRIT, Toulouse

Christophe KOLSKI

LAMIH, UMR UVHC CNRS 8201,
Valenciennes

Sebastien KUBICKI

ENI Brest, Lab-STICC UMR 6285,
Brest

Valerie MAQUIL

LIST Luxembourg

Guillaume RIVIÈRE

Estia, LaBRI UMR 5800

Tangible interaction on tabletop, an illustrated federating framework

Abstract. Since many years, the Human-Computer Interaction community is interested in the tangible user interfaces (TUI). A part of these TUI focuses on the interaction performed with one or several objects. The domain is in extension by the development of contactless objects (using NFC, RFID technology, etc.). In the system, tangible objects could represent data, action, or complex part. Interaction on a table, which is a common furniture in the everyday life and used in multiple activities (desktop, coffee table, kitchen table, etc.), opens a new way for the research and development in HCI. This article proposes to use a framework, previously proposed in a conjunct article, to characterize applications supported by the couple <interactive tabletop, tangible object>. These applications aim at supporting complex business tasks; they are described from a technological point of view on the one hand, and from an applicative point of view on the other hand. These applications show the benefit brought by the couple <interactive tabletop, tangible object> to the interaction and they are immersed in the framework. The framework shows with these instantiations that it is generic and supports such descriptions.

Key words: Tangible interaction, interactive tabletop, framework, business application

Résumé. Depuis plusieurs années, les interfaces tangibles impliquant des interactions réalisées via un ou plusieurs objets prennent une importance grandissante en interaction homme-machine. Ce domaine est en extension grâce au développement d'objets exploitant des technologies sans contact (NFC, RFID, etc.). L'objet tangible représente un sujet ou une action ; cet objet agit sur le système, telle une action sur une interface « classique ». L'interaction sur table, c'est-à-dire sur un meuble présent dans la vie courante et utilisé à diverses fins (bureau, table à manger, table de salon, table bar, etc.), ouvre un champ nouveau de recherche et de développement. Nous proposons d'illustrer un cadre proposé dans un article conjoint, en positionnant des applications mettant en œuvre le couple <table, objet tangible>. Plusieurs applications, visant à supporter chacune une tâche métier complexe, sont décrites à la fois d'un point de vue technologique et d'un point de vue applicatif. Ces applications montrent les apports de l'association <table, objet tangible> à l'interaction et sont caractérisées selon les dimensions du cadre de conception présenté dans un article conjoint, montrant ainsi la genericité et le pouvoir descriptif du cadre proposé.

Mots-clés : interaction tangible, table interactive, cadre de référence, application métier

Édité par Joëlle Coutaz, Université de Grenoble et Patrick Girard, Université de Poitiers

Soumis le 15 janvier 2016 – Accepté le 15 janvier 2017

1 INTRODUCTION

Cet article vise à illustrer avec différents travaux associant interfaces tangibles et tables interactives un cadre de référence associant ces deux concepts. L'adjectif « tangible » a deux significations dans le langage courant : « Qu'on connaît par le toucher ; matériel, sensible : la réalité tangible. » et « Que chacun peut constater, qui ne saurait être mis en doute : donner des preuves tangibles ... » (Larousse, 2013). Cette notion a été exploitée en Interaction Homme-Machine, visant à proposer à l'utilisateur « d'autres moyens »¹ pour interagir.

Cet article est le résultat de réflexions menées par des membres du Groupe de Travail (GT) TANGINT/FR de l'AFIHM², centré sur l'interaction tangible. Au cours des échanges liés à l'interaction tangible au sein de ce GT, nous avons identifié plusieurs domaines d'utilisation de l'interaction tangible : l'interaction tangible en relation avec la 3D, l'interaction corporelle s'intégrant, selon certaines définitions, dans le domaine de l'interaction tangible et enfin l'interaction tangible en relation avec les tables interactives. Dans cet article, c'est sur ce dernier type d'interaction que nous nous focalisons. Les tables interactives permettent d'interagir seul ou à plusieurs de manière collaborative ou non. Elles peuvent être dotées de différentes technologies et être mises en œuvre dans différents contextes.

Ainsi, afin de dresser un bilan des avancées du GT TANGINT, un premier article conjoint (Lepreux et al., 2016), présente un ensemble de définitions et de modèles, puis propose un cadre fédérateur. Dans cet article, ce cadre est illustré par des applications et des prototypes concrets réalisés par les acteurs de la communauté francophone. Les systèmes sont présentés relativement aux systèmes présents dans la littérature et systématiquement positionnés dans le cadre. Ce bilan de l'existant et sa structuration visent à recenser et à positionner les facteurs de conception essentiels au développement des surfaces interactives associées à une interaction tangible.

Cet article présente dans la section 2 le cadre de référence proposé dans l'article conjoint. La section 3 se focalise sur des applications faisant intervenir des interactions tangibles sur table dans un contexte d'usage centralisé tandis que la section 4 focalise sur celles qui se situent dans un contexte d'usage distribué ; ces applications sont décrites et positionnées dans le cadre de référence. Une discussion est proposée ouvrant sur des perspectives de recherche.

LES APPORTS DE CETTE RECHERCHE :

- ✓ Catégorisation de tables à interaction tangible dans un contexte d'usage centralisé
- ✓ Catégorisation de tables à interaction tangible dans un contexte d'usage distribué

2 CADRE DE REFERENCE³

Nous utilisons le cadre de (Dubois, 2009) comme support analytique aux systèmes à interaction tangible. Ce cadre propose des axes de variabilité pour des Systèmes Interactifs Mixtes (SIM). Un SIM, selon (Dubois, 2009) est un système interactif qui tire profit des capacités de stockage, de rendu et de transformation de données numériques par un système informatique et qui facilite l'intégration et l'exploitation des aptitudes physiques et habitudes de l'utilisateur, ainsi que des ressources physiques présentes dans son environnement d'interaction. Ces systèmes englobent donc les systèmes relevant de la réalité augmentée, de la virtualité augmentée, de la réalité mixte, des interfaces tangibles et

¹ Au sens POST-WIMP, au-delà du WIMP (Windows, Icon, Menu, Pointer) qui désigne le moyen d'interaction par écran, clavier, souris.

² AFIHM, Association Francophone d'Interaction Homme-Machine (<http://afihm.org/>).

³ Dans un but pédagogique, cette partie reprend intégralement celle disponible dans l'article conjoint (Lepreux et al., 2016).

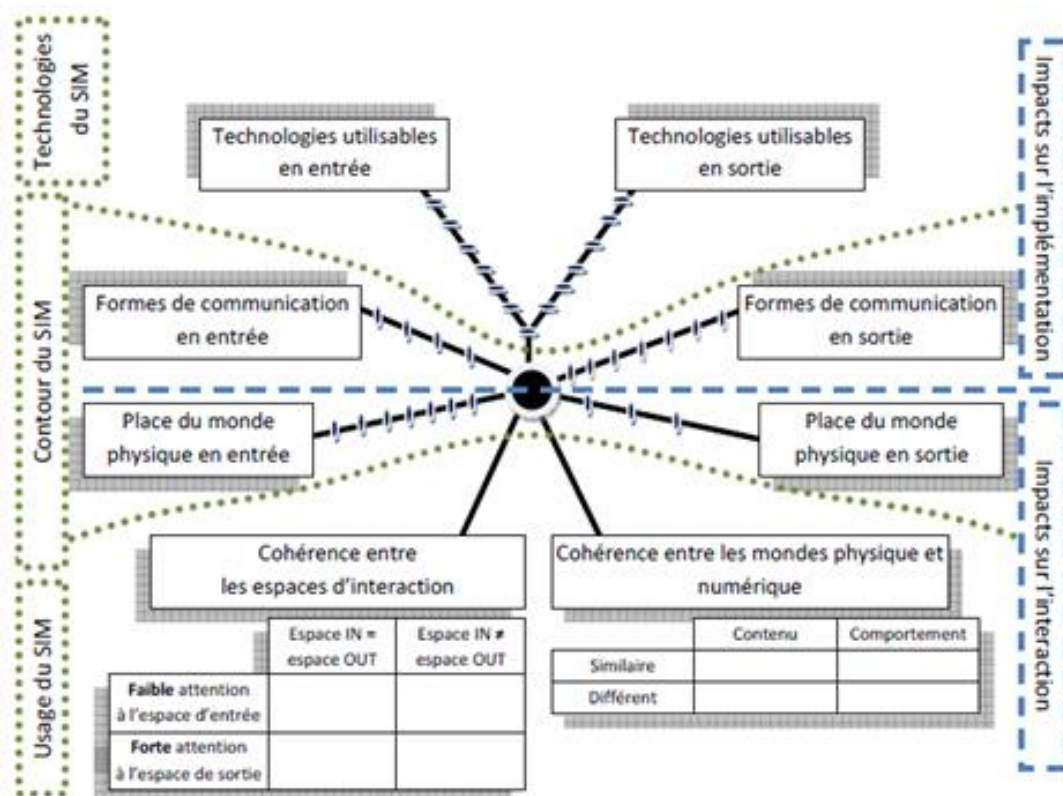
des systèmes enfouis. Ce cadre n'est donc pas spécifique aux systèmes à interface tangible mais est adéquat comme cadre de référence.

Dans un premier temps, les sources de variabilité utilisées dans le cadre sont décrites, ensuite le cadre sera présenté globalement.

2.1 Sources de variabilité

Cinq sources principales de variabilité entre les nombreuses formes de Systèmes Interactifs Mixtes présentés dans la littérature ont été identifiées (voir la Figure 1). Les deux premières sources contribuent à cerner le contour de la situation d'interaction mixte. Il s'agit de la place du monde physique dans un SIM et des différentes formes de communication en entrée / sortie. Deux autres sources de variabilité ont trait à la situation d'usage induite par le SIM. Il s'agit de la cohérence entre les espaces d'interaction d'une part et de la cohérence entre les mondes physiques et numériques d'autre part. Enfin, les technologies utilisées constituent la cinquième et dernière source de variabilité des SIM.

Figure 1. Diagramme de Kiviat des sources de variabilité (Dubois, 2009)



2.1.1 Place du monde physique en entrée et en sortie

Le monde physique peut occuper différentes places dans un SIM et ainsi contribuer de différentes manières à la communication avec le système informatique. En effet, un SIM peut s'appuyer sur le monde physique en entrée et peut avoir un impact sur le monde physique en sortie. En entrée, sept aspects physiques (position, présence, mouvement, orientation, forme, reconnaissance, combinaison) constituent un ensemble courant mais non exhaustif des places que peut occuper le monde physique dans un SIM pour contribuer à la transmission d'information au système informatique. Des aspects complémentaires tels que la rugosité ou la densité des objets pourraient, par exemple, être également pris en compte. En sortie, trois différents aspects physiques (rendu d'information dans le monde physique, déplacement d'un objet physique, aucun effet physique mais déclenchement d'une action

numérique) constituent un ensemble non exhaustif de places que peut occuper le physique dans le rôle rempli par un SIM en termes de production d'information en sortie.

2.1.2 Formes de communication en entrée / sortie

Une forme de communication d'entrée / sortie d'un SIM décrit les moyens employés pour diffuser et encoder les composantes du monde physique échangées au cœur d'un SIM pour permettre au monde physique de prendre les différentes places évoquées dans la section précédente. D'une part, il existe plusieurs formes possibles pour un même aspect physique : par exemple reconnaître un objet peut s'appuyer sur un encodage exploitant la variation d'une onde radio ou sur l'analyse du contenu d'une image. D'autre part, chacune de ces formes d'entrée / sortie peut donner lieu à une implémentation basée sur différentes solutions techniques. Par exemple, l'analyse visuelle d'une scène peut reposer sur une caméra infrarouge ou sur une caméra classique.

2.1.3 Cohérence entre les espaces d'interaction d'entrée et de sortie

Dans un SIM, des entités physiques et numériques coexistent. Pour accompagner l'utilisateur dans la réalisation de sa tâche et l'aider à atteindre ses objectifs, ces entités physiques et numériques doivent être reliées pour déclencher les traitements appropriés. Par exemple, dans Digital Desk (Wellner, 1991), les ressources nécessaires à l'interaction en entrée sont manipulées au niveau de la zone de rendu des informations produites par le système. Les espaces d'interactions en entrée et en sortie forment différentes configurations de l'environnement d'interaction. Ces différentes configurations induisent des variations de cohérence entre les espaces d'interaction qui peuvent être organisées selon deux dimensions : d'une part l'attention (faible ou forte) qu'il est nécessaire de porter aux dispositifs d'interaction en entrée pour transmettre une information et, d'autre part, la continuité entre les espaces d'interaction en entrée et en sortie qui peut exister ou non. Quatre situations de cohérence entre les espaces d'interaction émergent alors (cf. Figure 1).

2.1.4 Cohérence entre les mondes physique et numérique

En IHM, il est habituel de distinguer deux aspects de l'interaction : la perception et l'action. Ces deux aspects reposent respectivement sur le contenu et le comportement des échanges entre l'utilisateur et le système. Analyser la cohérence entre les mondes physique et numérique mis en présence dans un SIM peut donc en partie s'appuyer sur l'analyse du contenu et du comportement des liens existants entre les ressources physiques et numériques. Ces liens, dans un SIM, constituent la base des échanges entre l'utilisateur et le système informatique. À partir d'une comparaison binaire (similaire ou différent), quatre situations distinctes sont possibles (cf. Figure 1).

2.1.5 Technologies utilisées

En entrée, le dispositif le plus fréquemment utilisé a pour but la localisation d'éléments physiques. Des capteurs divers (lumière, pression, etc.) peuvent aussi être utilisés. Du point de vue des espaces de sortie, il s'agit essentiellement de rendre visible de l'information (écrans, vidéoprojecteurs, casques monoculaires, semi-transparents, immersifs ou à affichage déporté, lentille jouant le rôle d'un écran semi-transparent, ...). Enfin, à la frontière de ces deux espaces d'interaction se situent les dispositifs à retours d'efforts.

2.2 Cadre de variabilité des SIM

Ces cinq dimensions (place du monde physique, formes de communication, cohérence entre les espaces d'interaction, cohérence entre les mondes physique et numérique, dispositifs) peuvent être utilisées pour prendre conscience des spécificités d'un SIM, et mettre ainsi en évidence l'hétérogénéité potentielle des SIM que nous sommes amenés à concevoir et implémenter. Le diagramme de la Figure 1 reprend ces différents axes.

Les axes de variabilité utilisés pour cartographier et caractériser les SIM, traduisent trois préoccupations différentes, représentées sur la gauche de la Figure 1. Les quatre premiers axes (place du physique et forme de communication en entrée et en sortie) définissent le contour de l'interaction dans une situation d'interaction mixte. Deux axes complémentaires (cohérence des espaces d'interaction et des mondes physique et numérique) ont trait à la situation d'usage induite par le SIM. Enfin, les deux derniers axes (technologies en entrée et en sortie) représentent les préoccupations premières du domaine des SIM, l'appropriation de technologies émergentes.

Les deux sections qui suivent présentent cinq applications issues de la communauté francophone dans lesquelles interviennent une table interactive et des objet(s) tangible(s). La section 3 regroupe trois applications à visée d'utilisation centralisée tandis que la section 4 porte sur deux applications à usage distribué. Pour chaque application, nous précisons le contexte des travaux, la technologie utilisée et les services proposés. Chaque application est ensuite positionnée dans le cadre de référence présenté ci-dessus.

3 APPLICATIONS CENTRALISEES SUR TABLES À INTERACTION TANGIBLE

Les trois applications à utilisation centralisée sont les suivantes. ColorTable concerne la planification urbaine ; elle propose d'immerger la table tangible dans un environnement plus global afin d'impliquer les usagers dans la gestion de leur environnement. GéoTUI permet à des géophysiciens d'explorer à l'aide d'objets tangibles la visualisation 3D de couches terrestres sur une table. TangiSence porte sur l'usage d'une table dans le domaine de l'apprentissage par de très jeunes enfants.

3.1 Planification urbaine : ColorTable

La planification urbaine est un sujet complexe en raison de la diversité des acteurs et des domaines impliqués (nouvelles technologies, politique, économie, demandes sociétales). Cette complexité appelle de nouvelles solutions en sorte que les différents acteurs puissent participer au processus de planification selon une approche ascendante.

Les interfaces tangibles offrent des perspectives intéressantes comme le montrent de nombreux travaux fondateurs. Citons BUILD-IT (Rauterberg et al., 1998, Fjeld et al., 2001), Urp (Underkoffler and Ishii, 1999), Illuminating Clay (Piper et al., 2002), the Luminous Table (Ishii et al., 2002), BenchWorks (Seichter, 2004) ou ARTHUR (Broll et al, 2004). De même, la planification urbaine a servi de scénario type en Réalité Augmentée (par ex. Schnädelbach et al., 2002).

La nouveauté de la ColorTable tient à la combinaison de solutions techniques existantes et à leur extension par de nouvelles fonctionnalités, comme la définition de routes ou l'exploration de paysages sonores, résultats d'une conception itérative et participative de projets urbains réels impliquant une diversité d'acteurs (informaticiens, concepteurs, artistes, spécialistes en sciences sociales, et planificateurs urbains expérimentés).

3.1.1 Description de la technologie de la ColorTable

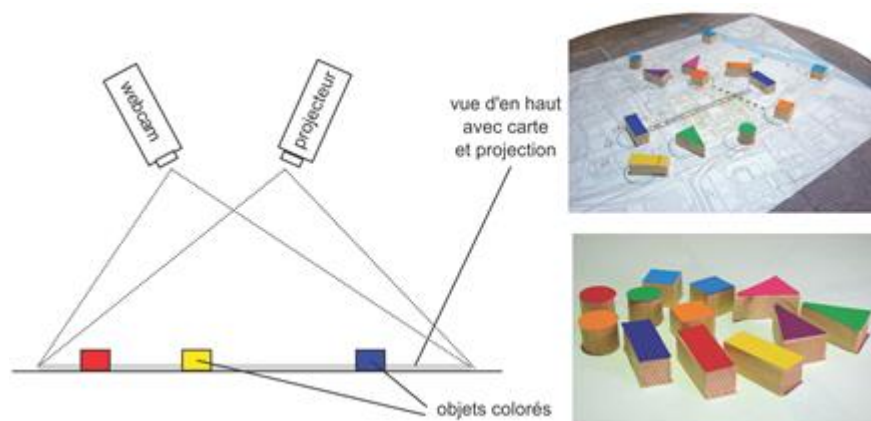
La ColorTable (Maquil, 2015) a été développée dans le cadre d'un projet européen FP6 intégré au projet IPCity. Les principaux composants de la *ColorTable* (cf. Figure 2) sont les suivants :

- Une table ronde (120 cm de diamètre) sert de surface commune de manipulation d'objets tangibles colorés et de plans papier à différentes échelles.
- Un vidéoprojecteur affiche sur la table la configuration en cours de conception : cartes et mesures produites par le système et, pour chaque objet tangible, sa fonction de représentation (objet urbain, route ou zone). Cet affichage informe l'utilisateur sur les

mesures et complète l'affichage d'informations additionnelles relatives aux objets tangibles présents.

- Les objets tangibles sont des blocs de bois de formes et couleurs distinctes de dimensions 3x3x3cm pour les cubes et les cylindres, 8x3x3cm pour les parallélépipèdes et 8x5x3cm pour les pyramides. Ils représentent des éléments architecturaux et atmosphériques.
- Une webcam fixée à 1,5 m au-dessus de la table filme la table et détecte les objets (forme et couleur) qui y sont posés.
- Deux ordinateurs portables assurent le suivi des objets colorés, chargent les contenus cibles de la base de données, et produisent les visualisations. En fonction de la configuration et de l'application, d'autres outils multimédias peuvent être utilisés pour fournir des sorties visuelles et audio.

Figure 2. La ColorTable



3.1.2 Application de la ColorTable : planification collaborative d'urbanisme

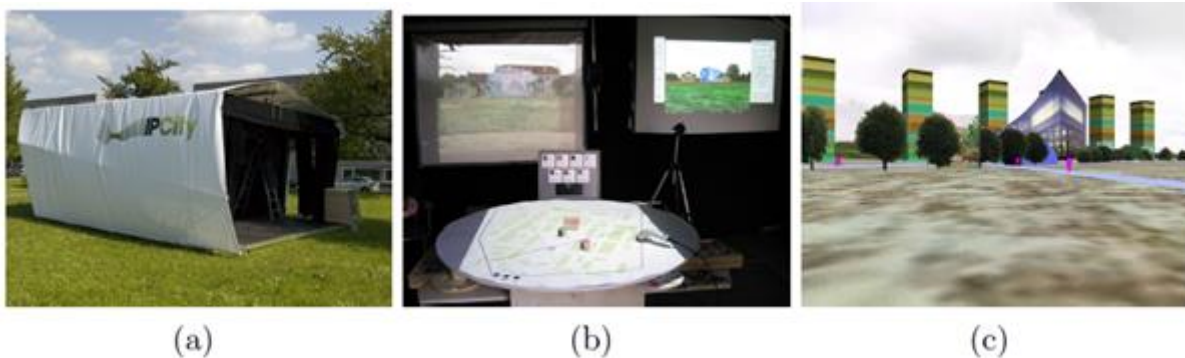
Il s'agit d'une table interactive tangible conçue pour les situations de travail collaboratif pour des équipes multidisciplinaires. Suivant un processus itératif de conception participative, ce projet a impliqué une équipe composée d'informaticiens, de concepteurs, d'artistes, et de spécialistes en sciences sociales, travaillant ensemble avec des planificateurs urbains expérimentés, de manière à identifier les besoins, explorer les possibilités de conception, élaborer les solutions techniques et observer et analyser l'usage des technologies directement sur le terrain. La ColorTable est installée à l'intérieur d'une tente⁴ (cf. Figure 3 a et b) en sorte que les participants puissent collaborer sur le terrain. Comme dans BUILD-IT (Rauterberg et al., 1998), la scène est projetée sur deux grands écrans verticaux offrant différents points de vue. Ces vues interactives invitent et encouragent le processus de conception urbaine. Contrairement à BUILT-IT, les scènes de la ColorTable ne sont pas des images de réalité virtuelle, mais intègrent la réalité sous plusieurs formes : vues en perspective du site urbain sur les écrans verticaux et vue d'ensemble inspirée des cartes sur la table. Pour naviguer dans le panorama, les utilisateurs peuvent changer l'orientation du point de vue avec un petit disque attaché à droite sous la table. Les différents points de vue panoramiques sont préenregistrés ; ils peuvent être chargés individuellement par lecture de code-barre (des codes-barres sont fixés sur les positions correspondantes du plan physique).

Une collection de contenus spécifiques au scénario (images 2D, modèles 3D, objets animés représentant des flux, sons) est stockée à l'avance dans une base de données

⁴ Appelée MR tent, enfermant un ensemble d'outils de Réalité Mixte (MR)

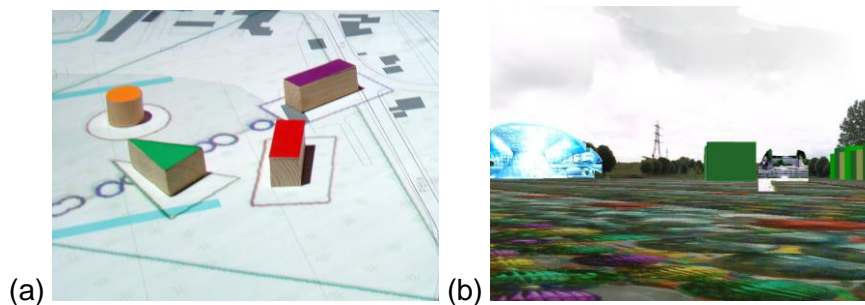
multimédia. Ils peuvent être accédés par de petites cartes magnétiques de contenu que les utilisateurs posent sur des aires réceptives spécifiques sur le bord de la table.

Figure 3. La ColorTable dans les projets de planification urbaine (a) la tente vue de l'extérieur, (b) une vue de l'intérieur dont la table interactive et deux écrans de projection, (C) Projection sur un écran.



Comme dans Urp (Underkoffler and Ishii, 1999) ou BUILD-IT (Rauterberg et al., 1998), la fonctionnalité de base de la ColorTable est de placer des objets tangibles colorés sur la carte projetée qui représente le site urbain. Par exemple, un objet triangulaire produit un simple objet virtuel (cf. Figure 4(a)), montrant un modèle 3D ou un panneau photographique (cf. Figure 4(b)). Chaque objet placé sur la table est aussi montré dans des vues en perspective.

Figure 4. (a) Objets triangulaires et leur feedback et (b) affichage de la vue associée dans la ColorTable



Par rapport aux travaux précédemment cités, un éventail de fonctions est ajouté (Maquil, 2015) :

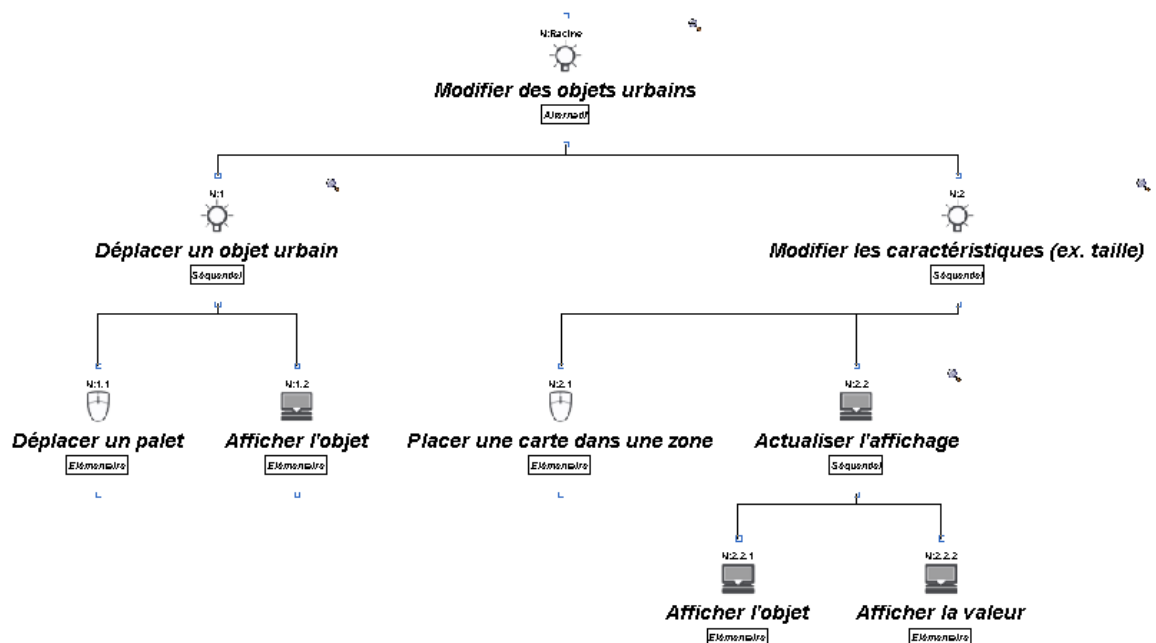
- Ajout de routes et de flux : pour décider des types de transport, leur vitesse de circulation et leur fréquence, les utilisateurs définissent les types de routes, animées par des flux d'objets numériques qui se déplacent sur un chemin donné. Pour créer des routes, des objets rectangulaires sont positionnés à chaque point de délimitation. Les couleurs différencient les autoroutes, les routes normales, les chemins et les voies de tramway visualisés par des bandes de largeur variable et peuplées de piétons, cyclistes, voitures et tramways.
- Afin de discuter de l'allocation et de l'utilisation du territoire, une zone peut être spécifiée par ses frontières avec les routes. Les cellules sont visualisées comme un fil de fer dans la vue haute et texturées de manière abstraite dans la vue en perspective.
- Exploration de paysages sonores : un son 3D est associé à chaque objet et à chaque panorama de la ColorTable. Le paysage sonore résultant peut être activé de trois manières différentes, par l'activation de positions d'écoute variées. Les utilisateurs peuvent basculer la vue de la caméra comme position d'écoute et entendre le son qui correspond au panorama ou à la diffusion de la vidéo. Une autre possibilité est d'activer la position d'écoute selon une partie de flux, le son résultant correspond alors au chemin d'un élément se déplaçant dans le flux. Enfin, la position d'écoute peut être contrôlée interactivement par un objet tangible de son, définissant la position et l'orientation des auditeurs virtuels.

- Historique et persistance : quand les utilisateurs s'accordent sur une scène intéressante, ils peuvent déclencher une mémorisation (en quelque sorte, un « gel » de la situation). Tous les objets tangibles colorés placés sur la table sont ajoutés à la scène de manière persistante et les objets physiques correspondants peuvent être retirés de la table. Cette configuration est alors stockée dans un fichier d'historique pour être chargée ultérieurement. Un objet « gelé » peut être annulé uniquement par un objet physique spécial appelé « objet effaceur ». En plus de la capacité de geler, les utilisateurs peuvent commander une capture d'écran de leurs compositions à tout moment. Les vues courantes sont alors enregistrées comme image et automatiquement imprimées. La fonctionnalité « histoire » permet non seulement un retour dans le temps à un état intéressant, mais aussi d'utiliser la temporalité comme une part du processus d'inspiration en regardant l'évolution des scènes au cours du temps.

3.1.3 Positionnement de la ColorTable dans le cadre de référence

Nous nous limitons ici à la modification d'objets urbains, tâche clé de ColorTable dans laquelle interviennent la table et des objets tangibles. La Figure 5 montre le modèle de tâches correspondant exprimé dans le formalisme KMAD (Baron et al., 2006). Ce modèle sert ensuite à l'analyse de la cohérence entre les espaces d'interaction en entrée et en sortie, de même entre les mondes physique et numérique.

Figure 5. Arbre de tâches modélisant la modification d'objets urbains dans la ColorTable

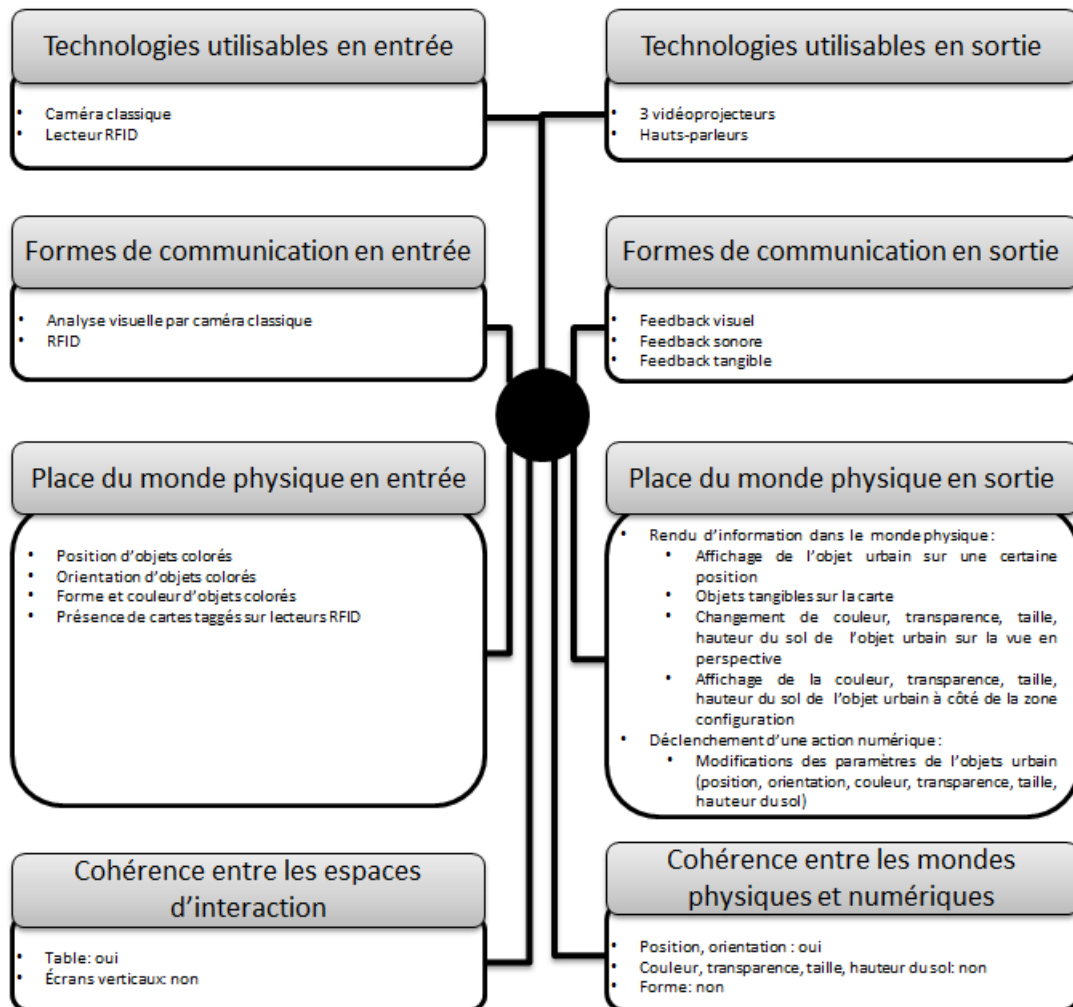


Comme le montre la Figure 6, les entrées se font avec des technologies optiques (caméra) et RFID en sorte que le système détecte la présence, la position, l'orientation, la forme et la couleur des objets tangibles. Les informations sont communiquées de façon visuelle et sonore par trois vidéoprojecteurs et huit haut-parleurs. La position et l'orientation des objets tangibles (cube en bois) permettent de définir le point de vue d'une caméra virtuelle sous la forme d'un rendu en perspective montrant la couleur, la transparence, la taille et la hauteur du sol sur les murs verticaux.

La cohérence entre les espaces d'interaction est détaillée dans la Figure 7. L'attention nécessaire pour manipuler les objets tangibles dépend de la précision visée. Une position approximative peut être due à une attention faible, tandis qu'une position bien alignée avec différents éléments demande une haute attention. La continuité est assurée puisque les modifications sont visualisées en temps réel dans tous les affichages.

Concernant la cohérence entre les mondes physiques et numériques (Figure 8), seul le déplacement d'objets montre une cohérence forte. Les objets urbains sont déplacés de la même façon dans le monde physique et sur les deux affichages. Les autres paramètres (hauteur du sol, taille, transparence et couleur) ne sont affichés de façon cohérente que dans les vues en perspective. Les objets physiques ne réagissent pas aux manipulations, et la table ne montre que les valeurs sélectionnées.

Figure 6. La ColorTable dans le cadre de référence pour la tâche *Modifier des objets urbains*



3.1.4 Conclusion sur la ColorTable

Sur le plan technique, la ColorTable (Maquil et al., 2008 ; Wagner et al., 2009, Maquil, 2015) se différencie des autres travaux par son mode de capture. Elle ne permet pas de détecter des marqueurs fiduciaires, chacun avec un identifiant unique, mais plutôt des propriétés naturelles de chaque objet, telles que la couleur, la forme et la taille. Cette méthode de capture permet d'homogénéiser les objets physiques dans la place du monde physique en entrée. Les objets tangibles assurent une bonne cohérence entre les mondes physiques et numériques.

Sur le plan conceptuel, la ColorTable est l'un des rares exemples de recherche portant sur l'étude de la conception et de l'usage d'une table tangible sur une longue période (4 ans). Les itérations multiples dans le cadre d'ateliers de conception participative ont permis de développer un prototype élaboré possédant plus de dix fonctionnalités et plus de 100 objets physiques. Les ateliers participatifs ont montré comment cet espace d'interaction complexe a permis aux participants de créer de nouvelles formes de narrations qui intègrent

la spatialité, différentes formes de représentation, ainsi que l'engagement haptique (Wagner, 2012). Cet outil a encouragé les participants à contribuer autrement au processus de planification. Ils utilisent de nouvelles pratiques, différentes des discussions habituelles, qui favorisent l'expert urbain (Maquil et al., 2008). Ainsi, la ColorTable a créé un nouveau langage qui tient compte de la complexité des problèmes urbains tout en restant accessible à tous.

Figure 7. Cohérence entre les espaces d'interaction dans ColorTable pour la tâche de modification d'objets urbains.

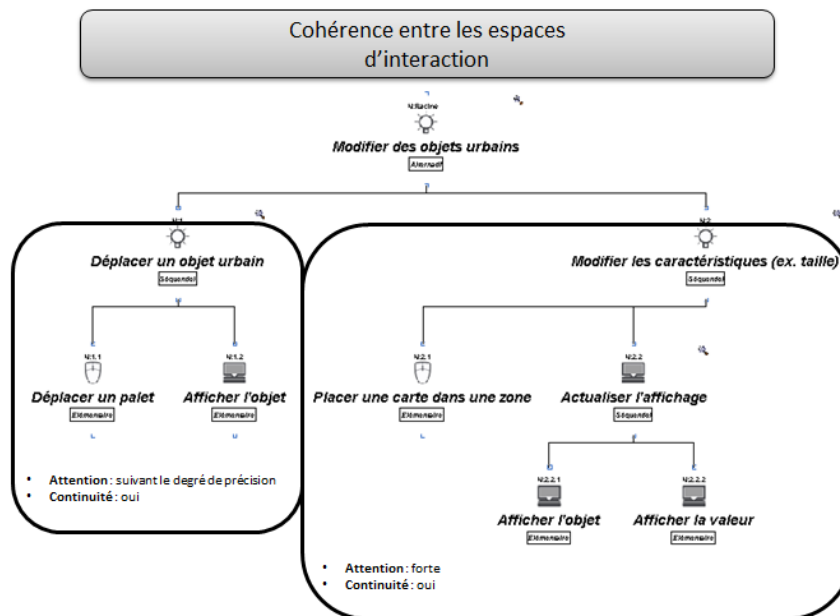
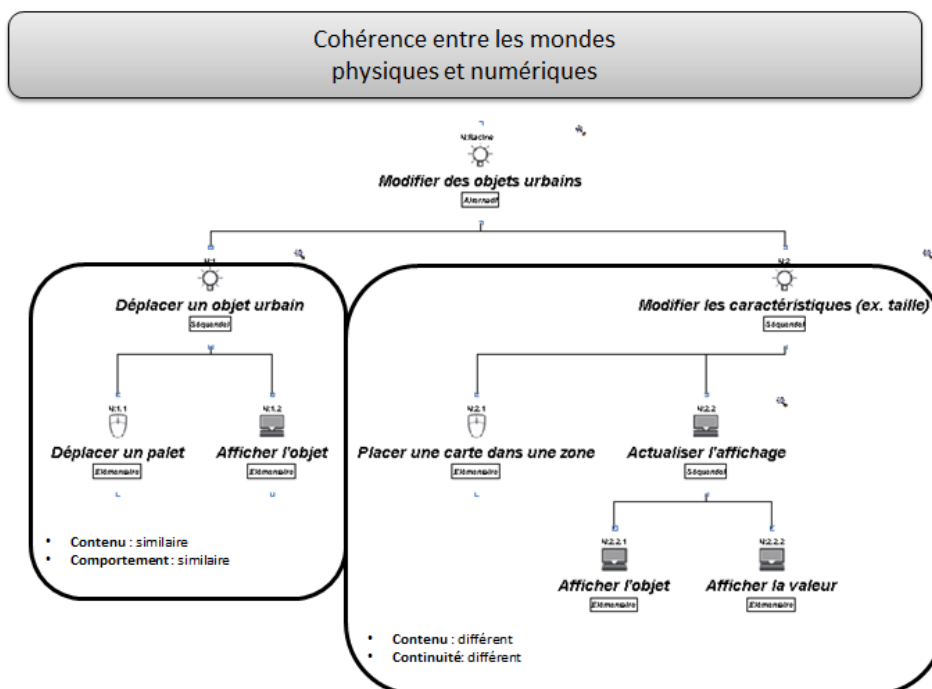


Figure 8. Cohérence entre les mondes physique et numérique dans ColorTable, pour la tâche de modification d'objets urbains.



L'instanciation du cadre de référence pour la *ColorTable* montre la diversité des possibilités en termes d'entrées et sorties, et de liens entre les effets des fonctionnalités. Cette instanciation montre également l'une des limites de l'interaction tangible pour la planification urbaine : la cohérence entre le monde physique et numérique ne peut être assurée pour la modification des éléments urbains puisque les objets en bois ne peuvent changer de forme physique.

Enfin, lors de l'instanciation du cadre pour cette application, nous avons été confrontés à la difficulté de représenter l'entièreté des fonctionnalités d'un système complexe comme la *ColorTable*, dans une seule instance du cadre. En effet, si on place l'ensemble des fonctionnalités et modes d'interaction d'un système aussi complexe, le modèle se remplit de l'ensemble des possibilités de captures et d'affichages et le cadre n'apporte plus sa fonction de positionnement. C'est pourquoi la solution a été de présenter dans l'article l'instanciation sur une seule sous-partie des fonctionnalités (choix d'un but impliquant table interactive et objets tangibles). De plus, notons que la décomposition du but en tâches est utile pour spécifier les cohérences entre les espaces d'interaction et entre les mondes physiques et numériques qui au sein d'un même but, ne donne pas les mêmes caractéristiques en fonction des tâches. Ce niveau de granularité n'était pas prévu par le cadre initial (Dubois, 2009, Lepreux et al., 2016), c'est l'instanciation par les systèmes présentés dans l'article qui l'ont mis en exergue.

3.2 Interaction tangible pour les géosciences : GeoTUI

Il existe un réel besoin d'une interaction POST-WIMP dans le domaine de l'ingénierie du pétrole. En effet, les géophysiciens doivent apporter divers éléments de réponse avant que ne soit décidée l'implantation d'un puits pétrolier. Notamment, ils doivent localiser une poche de pétrole et spécifier l'emplacement optimal du forage qui permettra d'exploiter la plus grande quantité de pétrole possible. Pour ce faire, les géophysiciens ont besoin de connaître la composition exacte du sous-sol, et d'étudier, par exemple, les pressions qui s'exercent. Un modèle (au sens mathématique) du sous-sol doit donc être élaboré. Un modèle préliminaire, sous la forme d'un nuage de points, est d'abord obtenu par acquisition sismique. Géologues et géophysiciens interprètent ce modèle brut et itèrent des hypothèses sur la nature des roches, jusqu'à obtenir un modèle mathématique le plus proche possible de la réalité. Des coupes 2D dans le modèle 3D sont successivement réalisées pour comprendre et modifier le modèle. Ces différentes tâches sont classiquement réalisées avec des systèmes informatiques via des interfaces graphiques (GUI). Nombre de géophysiciens, pourtant compétents, rencontrent des difficultés pour réaliser ce modèle mathématique avec les GUI. En effet, les réflexions géophysiques mobilisent énormément les ressources mentales du spécialiste et requièrent une forte concentration. Les outils actuels (menus déroulants, textes à saisir, cases à cocher) demandent beaucoup d'attention et éloignent le géophysicien de sa réflexion. La nécessité de collaborer entre géophysiciens et géologues pour obtenir un modèle précis ajoute des contraintes sur le type d'interaction à concevoir. L'enjeu est double : simplifier l'interaction et faciliter le travail en co-présence.

Nous notons de la part des géophysiciens et des géologues une réelle volonté de changer les modes d'interactions avec leurs simulateurs pour augmenter leur rentabilité. La réalité virtuelle est porteuse de points d'amélioration, en particulier dans sa dimension collaborative avec les salles immersives. Les grands instituts et organismes ont aménagé ces types de salles pour optimiser les conditions de travail. Mais, aujourd'hui, ces salles sont très peu utilisées. Le coût important du dispositif et la place qu'il requiert (une très grande salle dédiée à un seul usage) ne permettent pas d'en posséder plus d'un exemplaire. Les utilisateurs doivent donc se conformer à un planning de réservation. Les téraoctets de données qui sont manipulés doivent être transférés et la plupart du temps traduits en un autre format que celui utilisé sur les postes de travail. Quant aux casques, ils ne sont parfois pas supportés par les utilisateurs. Ils ne favorisent pas la concentration et empêchent toute communication interpersonnelle. L'immersion totale ne s'impose donc pas comme une

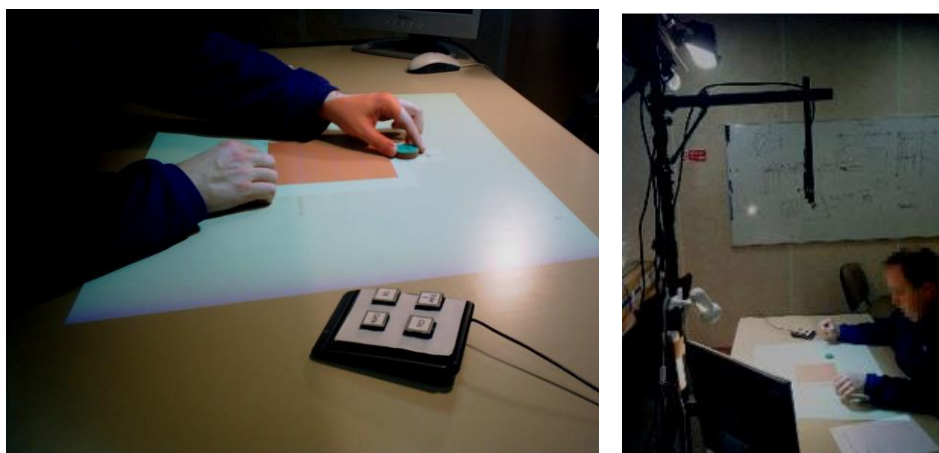
solution satisfaisante pour un travail quotidien. Une solution envisagée par un groupe pétrolier consiste en un "mur d'écrans" associé à une interaction au doigt. Si elle assure une grande précision en visualisant une coupe à l'échelle 1:1 (tous les pixels sont affichés sur le même mur), cette solution ne favorise pas les interactions simultanées de plusieurs personnes et impose la station debout. Nous faisons l'hypothèse que l'interaction à plusieurs personnes (2 à 4 géologues et géophysiciens) avec les logiciels de visualisation et les calculateurs existants de géologie et de géophysique, est plus ergonomique et adaptée aux conditions de travail quotidiennes, lorsqu'elle prend la forme d'une table interactive sur laquelle l'utilisateur déplace des interacteurs tangibles.

Il y a peu de travaux relatifs à des applications sur tables interactives appliqués au domaine de l'ingénierie du pétrole. (Ishii et al., 2004) ont proposé une interface permettant de sculpter des surfaces géologiques. Et, récemment, deux applications ont été réalisées sur la table Microsoft Surface (Sultanum et al., 2010 ; Petrotek, 2013). Elles permettent de contrôler des plans relatifs à la production/extraction de pétrole et d'interagir de manière tactile et tangible pour l'ingénierie des réservoirs.

GeoTUI est un prototype de table d'interaction multimodale (Couture et al., 2008) (équipée d'outils, de règles qui sont autant de TUI) pour l'aide aux géophysiciens chargés de reconstituer un modèle tridimensionnel du sous-sol profond sur la base de l'interprétation de données sismiques. GeoTUI combine les avantages liés à un espace de travail traditionnel, cartes en papiers, crayons, règles, avec la puissance de simulation des logiciels de géologie.

Ce prototype a permis également une expérimentation de nouvelles formes d'interactions tangibles et de montrer que les interacteurs proposés sont adaptés au contrôle de données. En effet, deux campagnes de tests, échelonnées sur 1 an, ont été menées. Chaque fois, le prototype GeoTUI a été transporté jusqu'à IFP Energies Nouvelles, afin de mener des tests utilisateurs sur le lieu de travail des géophysiciens. La première expérimentation était exploratoire. Elle a permis de confirmer la supériorité des interfaces tangibles sur une table interactive par rapport à une interface type GUI pour des séries d'exercices métiers ; ce qui n'est pas surprenant compte tenu du résultat bien connu du bénéfice pour la réalisation d'une tâche d'une manipulation directe par rapport à une manipulation indirecte. Elle a également permis de convaincre le partenaire métier et les géophysiciens, sur qui les expérimentations sont centrées, de l'intérêt d'un système de type table interactive. La seconde expérimentation, avec 12 sujets, avait pour but de qualifier les différents modes d'interaction pour réaliser une ligne de coupe.

Figure 9. GeoTUI lors d'une expérimentation à l'IFP Energie Nouvelle : trépied, caméra, pavé numérique, palet, etc.



3.2.1 Description de la technologie de GeoTUI

Le prototype de GeoTUI, visible en Figure 9, est équipé d'une caméra couleur ieee1394 Sony XC-555P et d'un vidéoprojecteur EPSON EMP 7200. Ces deux dispositifs sont fixés en

hauteur sur un trépied SHOWTEC 70128 Alu Stand double T-bar à élévation variable. Le tout se range dans un carton (20x20x1,50 cm) et une valise (50x75x30 cm). Pour faire fonctionner l'interface, une table ou un bureau est requis. La seule contrainte concerne la surface du meuble utilisé : elle ne doit pas comporter de dessins de nœud de bois trop contrastés, ni présenter un aspect trop sombre, afin de ne pas perturber la vision de l'utilisateur. Les interacteurs proposés sont : une règle de 30 cm, des palets ronds de 35 mm de diamètre, un boîtier de validation muni de quatre boutons physiques, un pour valider la coupe sélectionnée et obtenir un plan de coupe, un pour revenir à la carte, un pour effacer les cinq dernières traces de coupe sur la carte et un pour accrocher/décrocher un palet à un tracé de coupe. L'interface utilisateur GeoTUI communique via socket avec l'application JOHN (Jerry On tHe Net) développée par IFP Energies nouvelles (Jurado et al. 1996).

3.2.2 Application de GeoTUI

Pour situer une coupe et pour manipuler des points de contrôle, les interacteurs tangibles disponibles comprennent une règle et des palets. Le travail en équipe peut être amélioré par cette approche, où l'usage d'une interaction multimodale et d'une interface tangible lors de réunions de travail permet une interactivité entre les utilisateurs ; interactivité d'autant plus forte que les données peuvent être manipulées à plusieurs autour d'une table. GeoTUI propose donc un espace de travail qui se rapproche des conditions de travail usuelles des géophysiciens dans les bureaux d'études. La surface de la table devient ainsi un espace d'échange privilégié où les utilisateurs peuvent partager une carte géographique et un tracé sismique. La carte géographique est affichée sur la surface de la table à l'aide d'un vidéoprojecteur, et le système informatique peut connaître la position des interacteurs (règle, palets) en utilisant une caméra. GéoTUI offre ainsi une informatique présente, mais non intrusive, qui observe l'espace de travail de l'utilisateur. Espace d'action et espace de perception se rejoignent sur la table, satisfaisant en cela le principe de (Norman 1999).

3.2.3 Positionnement de GeoTUI dans le cadre de référence

La description de GeoTUI selon le cadre de référence est illustrée en Figure 10. Les formes de communication sont *visuelles*, tant en entrée (localisation des interacteurs par analyse des images capturées par une caméra) qu'en sortie (affichage des données, cartes géographiques et coupes géologiques, par vidéo-projection). Une ligne de coupe se déduit par la détection de la *position* et de l'*orientation* des objets physiques (palets ou règle, selon l'interaction choisie). Une forme de communication complémentaire utilise le toucher par l'appui sur les boutons mécaniques d'un boîtier pour enclencher les actions.

La Figure 11 et la Figure 12 traduisent respectivement la cohérence entre les espaces d'interaction et la cohérence entre les mondes physique et numérique pour le cas de la règle comme interacteur et pour le cas de la tâche d'exploration d'un volume de sous-sol par sélections successives de coupes. Cette tâche est ici modélisée à l'aide de K-MADe (Caffiau et al., 2010). Remarquons que ces illustrations auraient été différentes pour un palet et deux palets, également disponibles dans GeoTUI.

L'attention portée au dispositif d'interaction en entrée (la règle manipulée directement sur la carte vidéo-projetée) peut être qualifiée de faible. Ceci a été vérifié lors d'expérimentations décrites dans (Couture et al., 2008). L'interaction avec une règle ou avec deux palets ou avec une souris ont été comparées. L'interaction avec la règle demande moins d'attention que les deux autres formes d'interaction (Couture et al., 2008). L'utilisation co-localisée des interacteurs (de la règle en l'occurrence, mais cela est également valable pour les palets) sur l'affichage de la carte permet d'établir que les espaces d'interaction en entrée et en sortie sont superposés. En revanche, la superposition des espaces d'interaction en entrée et en sortie n'est pas conservée concernant l'utilisation du boîtier physique pour valider les actions. Cependant, de par les observations de manipulation bimanuelle asymétrique de l'ensemble règle+boîtier (Rivière et Couture, 2007) et de par l'emploi de vrais boutons physiques palpables qui dépassent de la surface du boîtier et autorisent de ne pas

porter d'attention visuelle au dispositif, nous considérons l'attention portée à ce boîtier comme faible.

Concernant la cohérence entre les mondes physiques et numériques, nous la considérons comme ayant des contenus et comportements similaires pour l'interacteur règle (Figure 12) alors que nous la considérerions comme différents, tant en termes de comportement que de représentation, pour les autres interacteurs construits à partir d'ancres physiques (1 palet ou 2 palets). Pour la cohérence du boîtier de validation, bien que l'action d'appui discrète et brève sur un bouton physique (c'est-à-dire, non continue, non inscrite dans le temps) soit adaptée à la représentation d'une opération discrète de validation, nous considérons les contenus et comportement de ce boîtier vis-à-vis de la tâche comme différents car il est dans ce cas difficile de parler de similarité.

Figure 10. GeoTUI dans le cadre de référence.

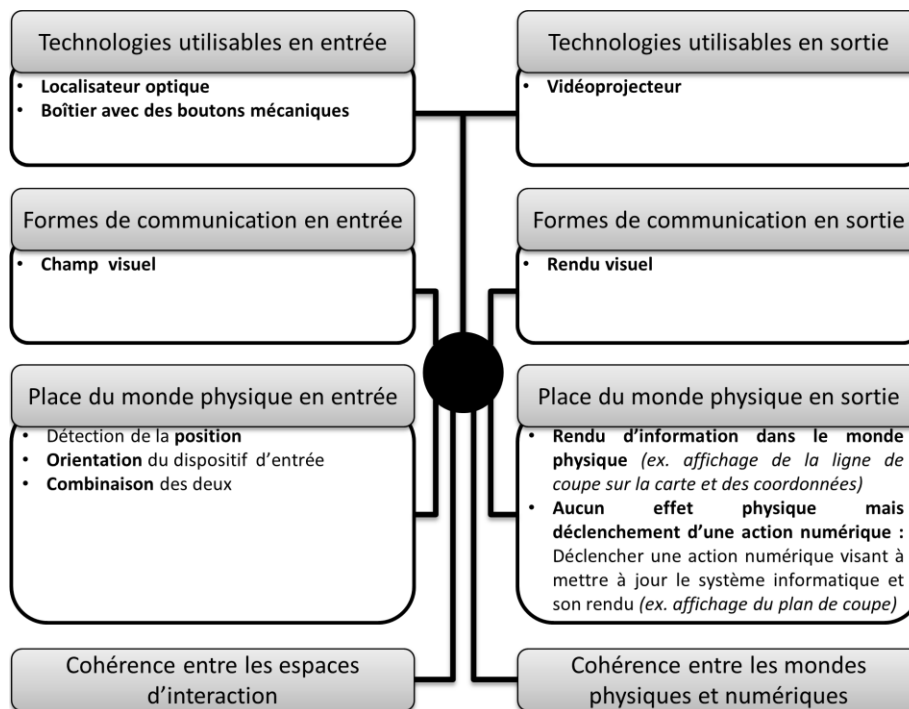


Figure 11. Cohérence entre les espaces d'interaction dans GeoTUI, pour l'interacteur règle et pour la tâche d'exploration.

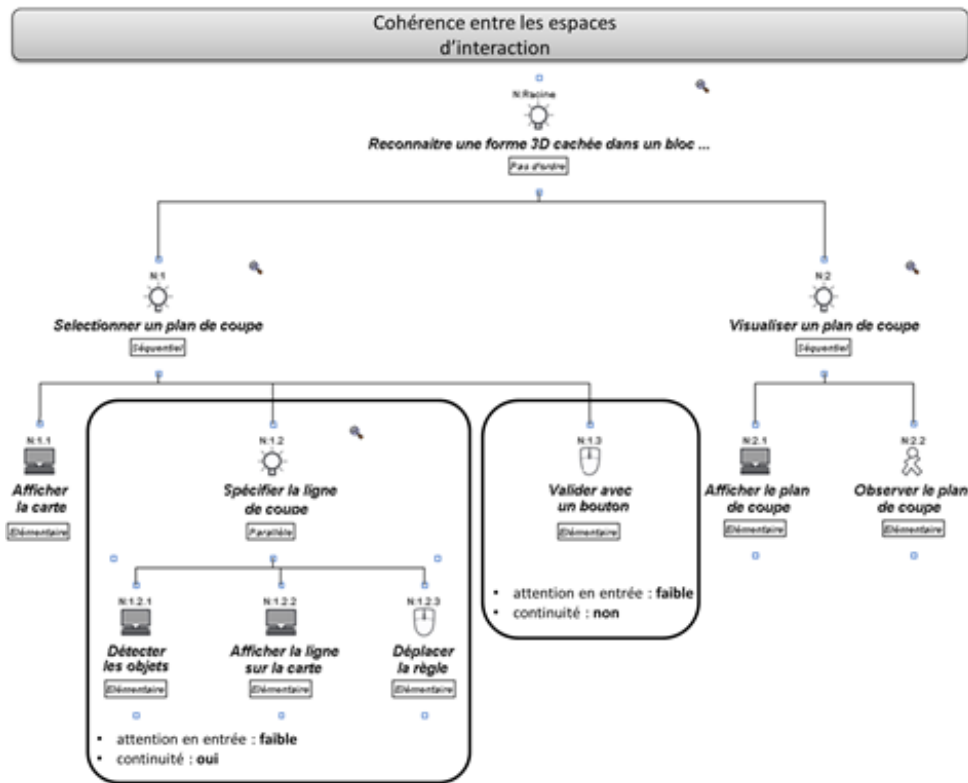
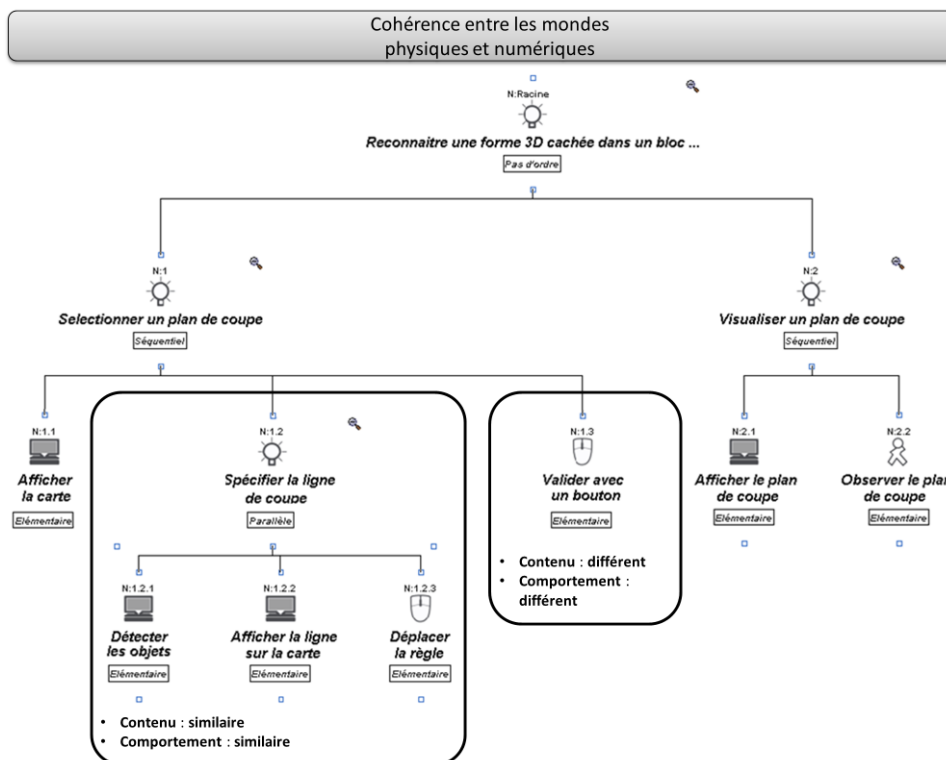


Figure 12. Cohérence des mondes physique et numérique dans GeoTUI, pour l'interacteur règle et pour la tâche d'exploration.



3.2.4 Conclusion sur GeoTUI

Sur le plan technique, la détection optique et la vidéo-projection par le dessus ne sont pas qu'un choix de prototypage. C'est aussi un choix qui offre au système la particularité d'être indépendant du matériel table. La fixation des dispositifs d'entrée et de sortie sur le trépied permet de recourir à l'utilisation d'une table déjà en place.

Sur le plan conceptuel, interagir dans le plan horizontal d'une table, permet de retrouver les conditions spontanées de travail des utilisateurs métier. Pour parfaire cette orientation conceptuelle, tous les composants WIMP ont été retirés au seul profit d'outils physiques pour interagir avec le monde numérique. Il est montré expérimentalement qu'interagir dans le plan horizontal avec des outils physiques n'est pas suffisant pour produire des conditions d'interaction supérieures à une GUI. Le choix d'un interacteur adapté à la tâche (en l'occurrence, la règle) est nécessaire pour obtenir l'effet que les utilisateurs attendent. En effet, les participants ont constaté une meilleure concentration - sur le problème à résoudre (d'après ce qu'ils expriment par retour de questionnaire), quand l'interacteur est adapté.

En décrivant les propriétés physiques captées par la technologie utilisée en entrée, l'instanciation du cadre de référence pour GeoTUI laisse envisager le remplacement par une technologie équivalente. Cette instanciation fait également apparaître des propriétés importantes de l'interaction mise en œuvre, comme le niveau d'attention *faible* et le comportement *similaire* pour la tâche impliquée. En revanche, d'autres aspects importants ne sont pas reflétés par le cadre de référence. Par exemple, concernant la mobilité du système, la table et le trépied utilisés ne sont pas évoqués alors qu'ils autorisent de déplacer facilement le système pour la conduite d'expérimentations *in situ*. Ou, concernant la collaboration, il n'apparaît pas que l'interaction a lieu dans le plan horizontal, alors qu'elle recrée les conditions de travail usuelles des utilisateurs métiers.

3.3 Interaction tangible pour enfants : *TangiSense*

De nombreux chercheurs se sont intéressés aux tables comme support éducatif. Par exemple, Thomson (Thomson et al., 1992, Ampofo et al., 1993) et (Fyhri et al., 2004) ont montré que la table (c'est-à-dire une table standard et non interactive) est un bon compromis entre le besoin de recréer l'environnement réel et celui qui expose les enfants dans des situations de trafic routier réel. Ainsi, (Fyhri et al., 2004) utilisent le concept de table (maquette avec des objets représentant la circulation routière) pour sensibiliser les enfants à la problématique du trafic routier.

(Do-Lenh et al., 2010) et (Dillenbourg & Evans, 2011) proposent différentes configurations de mise en œuvre de tables interactives en salle de classe. Les mises en situation simulées sur tables avec objets permettent aux enfants de se projeter dans des situations et d'en connaître les conséquences, ce qui favorise l'apprentissage. Par exemple, Labrune et McKay (2005) montrent un apprentissage et une utilisation aisés par des jeunes enfants d'une caméra tangible, appelée Tangicam, associée à une table interactive DiamondTouch. Par ailleurs, trois activités de dessin, de spécification de couleurs et de partition musicale ont été proposées dans (Rivière et al., 2011).

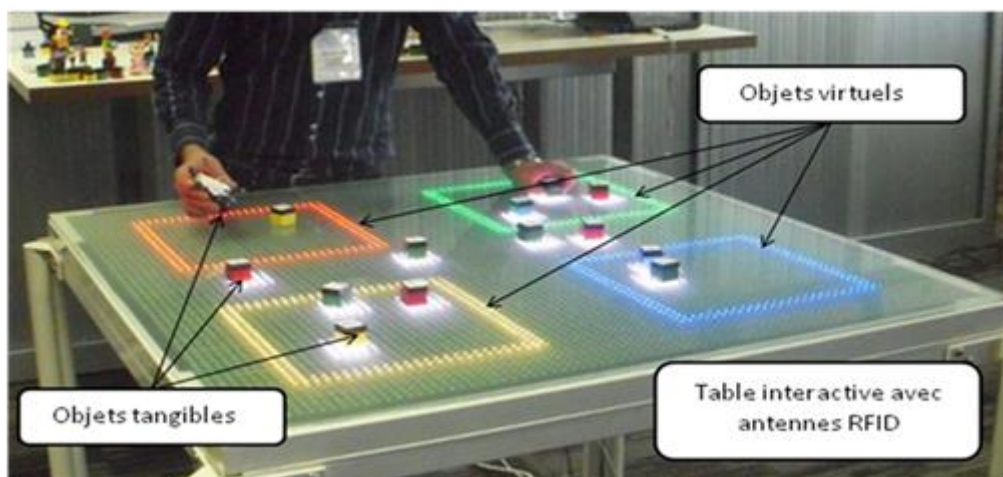
Les recherches actuelles montrent que les tables interactives peuvent aisément s'intégrer dans les écoles (Dillenbourg & Evans, 2011, Kubicki et al., 2012a, Shaer et al., 2012, Kharrufa et al., 2013), permettant aux jeunes enfants de travailler de manière ludique soit individuellement, soit collectivement, et dans ce dernier cas de leur donner la possibilité de collaborer. Les élèves peuvent travailler en même temps autour de la table, manipuler des objets avec l'aide de leur professeur (également présent autour de la table). Ces acquis sont à l'origine de l'application « apprentissage et reconnaissance des couleurs » disponible sur la table interactive *TangiSense* (Kubicki et al., 2015).

3.3.1 Description de la technologie de TangiSense

La table interactive *TangiSense* (Kubicki et al., 2012b) (cf. Figure 13) permet des interactions avec des objets numériques mais également avec des objets tangibles (Soute et al., 2009). Les interactions avec ces derniers sont rendues possibles grâce à la technologie RFID. L'utilisation de la RFID permet de détecter les objets présents à la surface de la table, de les identifier grâce à une ou plusieurs étiquettes collées en dessous de l'objet (une étiquette RFID étant unique), de stocker des informations directement dans ces objets ou encore de les superposer. Il est donc possible de travailler avec un ensemble d'objets sur une table, de sauvegarder les informations dans ces objets (par exemple, leur dernière position) pour ensuite les réutiliser sur une autre table à un autre moment tout en embarquant les informations avec soi (par exemple, le dernier état d'une partie d'échecs).

Les interactions sur la table interactive *TangiSense*, met en jeu des objets tangibles qui peuvent eux-mêmes agir sur des objets virtuels affichés ou vidéoprojetés (mais qui ne peuvent pas être directement manipulés). Dans sa première version, conçue par la société RFIdées⁵, *TangiSense* est une surface de « dalles » contenant chacune 64 antennes (8 x 8) de 2,5 cm de côté sur une surface de 1x1m.

Figure 13. La table *TangiSense* et une application d'apprentissage en co-présentiel, d'après (Kubicki et al., 2012b)



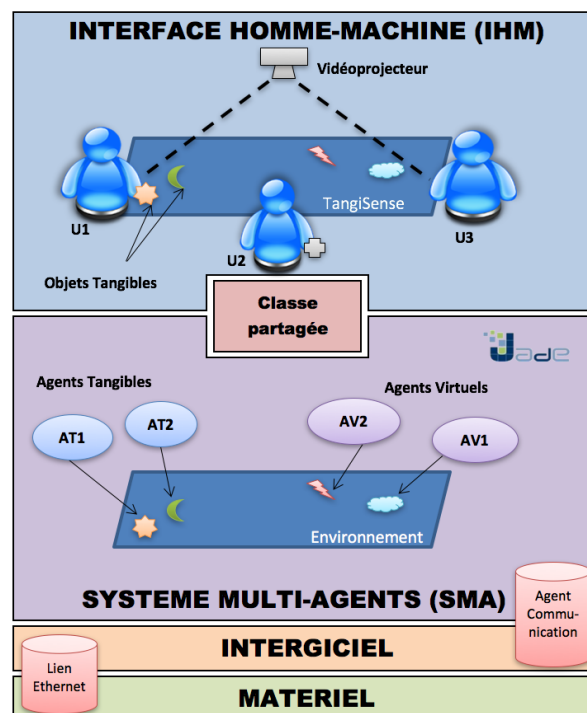
Afin de gérer les interactions (table-objets) et d'intégrer de l'« intelligence » à la table, une architecture a été proposée intégrant un Système Multi-agent (Lebrun et al., 2013). Cette architecture, représentée dans la Figure 14, comprend les couches suivantes :

- La couche matérielle (« Hardware ») correspond à la table proprement dite,
- La couche intergicielle (« Middleware ») détecte les objets tangibles (équipé chacun d'une étiquette RFID), traite les événements produits par les objets tangibles et communique les modifications de position au Système Multi-Agents.
- La couche Système Multi-Agents (SMA) avec sa capacité de raisonnement, gère le comportement des objets tangibles et des objets numériques. A chaque objet tangible et/ou numérique, est associé un agent (Lebrun et al., 2010). Les informations provenant des lecteurs RFID sont transmises par la couche Intergiciel. Ces informations sont utilisées par les agents pour construire la vision de leur environnement. L'organisation hiérarchique entre les agents permet une gestion intelligente des objets mais également

⁵ www.rfidees.com

- de leur attribuer des rôles (Adam et al., 2008). Afin de concevoir un Système Multi-Agents qui contrôle le comportement des objets tangibles ou numériques pour une application donnée, il est impératif de définir les relations entre les différents types d'agents ainsi que les rôles fonctionnels qu'ils vont jouer dans l'application.
- La couche « Interface Homme-Machine » (IHM) se charge de communiquer avec les utilisateurs et transmet les informations liées aux interactions des utilisateurs aux autres couches basses (par exemple la création et le déplacement d'un objet numérique sous un objet tangible manipulé par un utilisateur). La couche IHM contient l'intégralité des méthodes pour le rendu visuel grâce aux LED ou à la vidéoprojection et rendu sonore.

Figure 14. Architecture logicielle de la table interactive *TangiSense* (Kubicki et al., 2013)



3.3.2 Application de *TangiSense* : apprentissage pour enfants

L'objectif de l'application « apprentissage et reconnaissance des couleurs » était d'observer comment les enfants allaient interagir avec la table dans un contexte collaboratif et avec des interactions « naturelles » (tangibles). Le scénario de l'application s'appuyant sur le programme d'enseignement dans les écoles maternelles françaises, nous avons demandé à un professeur des écoles d'imaginer un ou plusieurs scénarios nécessitant l'utilisation d'une table interactive et d'un ensemble d'objets sans donner de limite ou de contrainte. Il en est ressorti une application simple où les enfants doivent replacer un ensemble d'objets ayant « perdu leur couleur » dans le cadre de la couleur appropriée (par exemple, un soleil en « noir et blanc » à placer dans le cadre de couleur jaune). Pour cela, l'enfant dispose d'un ensemble d'objets (petits cubes en bois comportant chacun une image en noir et blanc). L'enfant doit ensuite déterminer ce que l'image représente, y associer la couleur appropriée et venir placer l'objet dans le cadre coloré affiché sur la table interactive. Une fois les objets placés, l'enfant est invité à vérifier ses choix à l'aide d'un personnage représentant un magicien. Le magicien lance alors la procédure de vérification et annonce à l'enfant les éventuelles erreurs ou bonnes réponses.

Lors d'une première évaluation en milieu écologique (école maternelle) avec des enfants âgés de 3 à 5 ans, les observations ont montré que ceux-ci interagissaient avec l'application

sur table interactive de manière aisée (Kubicki et al., 2011 ; Kubicki et al., 2015) : ces utilisateurs ont facilement compris l'objectif et le fonctionnement. Lors d'une évaluation menée cette fois avec des adultes (Kubicki et al., 2012b), l'objectif était de proposer différentes configurations d'affichage incitant ou non à la collaboration autour de la table : c'est-à-dire que les affichages montraient des zones de travail qui étaient, soit partagées, soit dédiées à des utilisateurs (avec autant de zones que de participants). Ainsi, l'objectif était d'analyser comment les participants se positionnaient autour de la table selon les différentes configurations, et si cela avait un impact sur la collaboration. Dans les deux cas, l'interaction avec les objets tangibles a été bien acceptée et bien comprise. Beaucoup de suggestions d'applications sur table interactive (apprentissage des nombres pour des enfants un peu plus âgés, en gardant les mêmes principes d'interaction avec des objets tangibles), beaucoup d'idées de jeux de plateau (échecs, dames, Monopoly®, etc.) ou d'applications orientées métier (souvent en lien avec la gestion d'espace), nous ont été proposées par les participants (enseignants en école dans le cadre de la première évaluation, ingénieurs, doctorants et enseignants-chercheurs dans le cadre de la seconde).

3.3.3 Positionnement de *TangiSense* dans le cadre de référence

La Figure 15 montre le positionnement de *TangiSense* dans le cadre de référence. La technologie en entrée est principalement la RFID pour les objets tangibles. Ces objets peuvent être équipés de un ou plusieurs tags. En sortie, la table permet un affichage uniquement à l'aide de LED intégrées dans la dalle de capture RFID. Un système de vidéoprojection peut être ajouté si un affichage plus fin est nécessaire. Des haut-parleurs décentralisés peuvent également être connectés. Ces technologies s'appuient donc sur des formes de communication visuelle, sonore et tangible.

La Figure 16 et la Figure 17 traduisent respectivement la cohérence entre les espaces d'interaction et la cohérence entre les mondes physique et numérique pour l'ensemble des tâches de l'application "apprentissage des couleurs". Comme dans les exemples précédents, la tâche est modélisée à l'aide de K-MADe (Caffiau et al., 2010).

Dans cette application, nous considérons deux types de dispositifs d'interaction en entrée (les objets cubes et l'objet magicien). L'attention associée pour chacun de ces objets peut être qualifiée de faible. L'utilisation de ces objets sur l'affichage des zones permet d'établir que les espaces d'interaction en entrée et en sortie sont superposés.

Concernant la cohérence entre les mondes physiques et numériques, nous la considérons comme ayant des contenus et comportements similaires pour ce qui est de l'ensemble des objets qui sont posés (Figure 17) ; mais individuellement, il y a une différence entre les deux mondes car l'image affichée est un halo lumineux, à visée ici uniquement de feedback de détection de l'objet. Concernant l'objet magicien, il y a bien continuité puisque la réaction du monde virtuel est en continuité avec l'objet. Concernant les tâche automatiques (ou système), on retrouve trois types de comportement : pas de comportement lors de la tâche d'affichage des zones, des comportements similaires lors du traitement des différents objets cubiques associés à des images, et un traitement différent pour le "magicien" car se déroulant en fonction des autres objets posés (dépendant du traitement des données).

Figure 15. *TangiSense* dans le cadre de référence

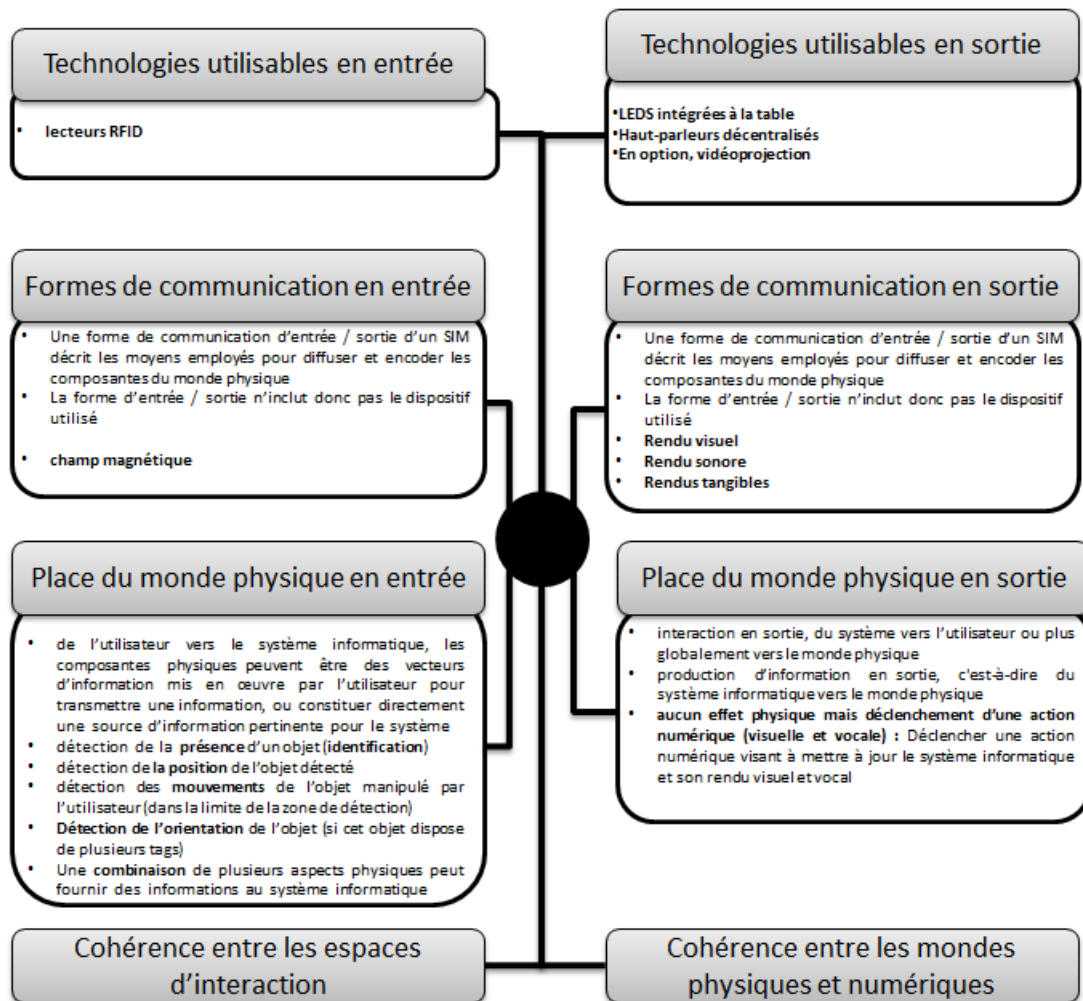


Figure 16. Cohérence entre les espaces d'interaction dans *TangiSense* pour l'application « apprentissage et reconnaissance des couleurs »

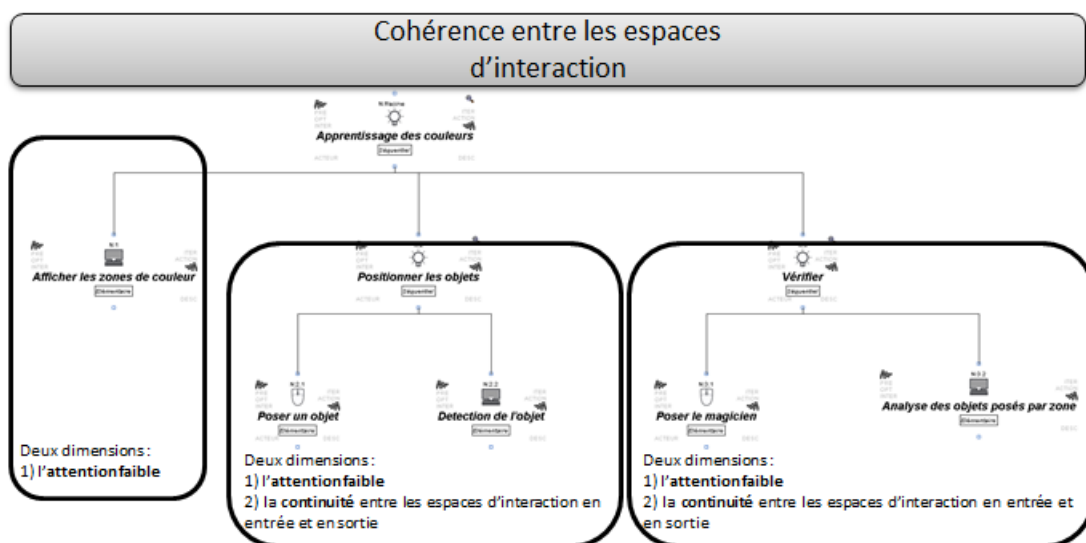
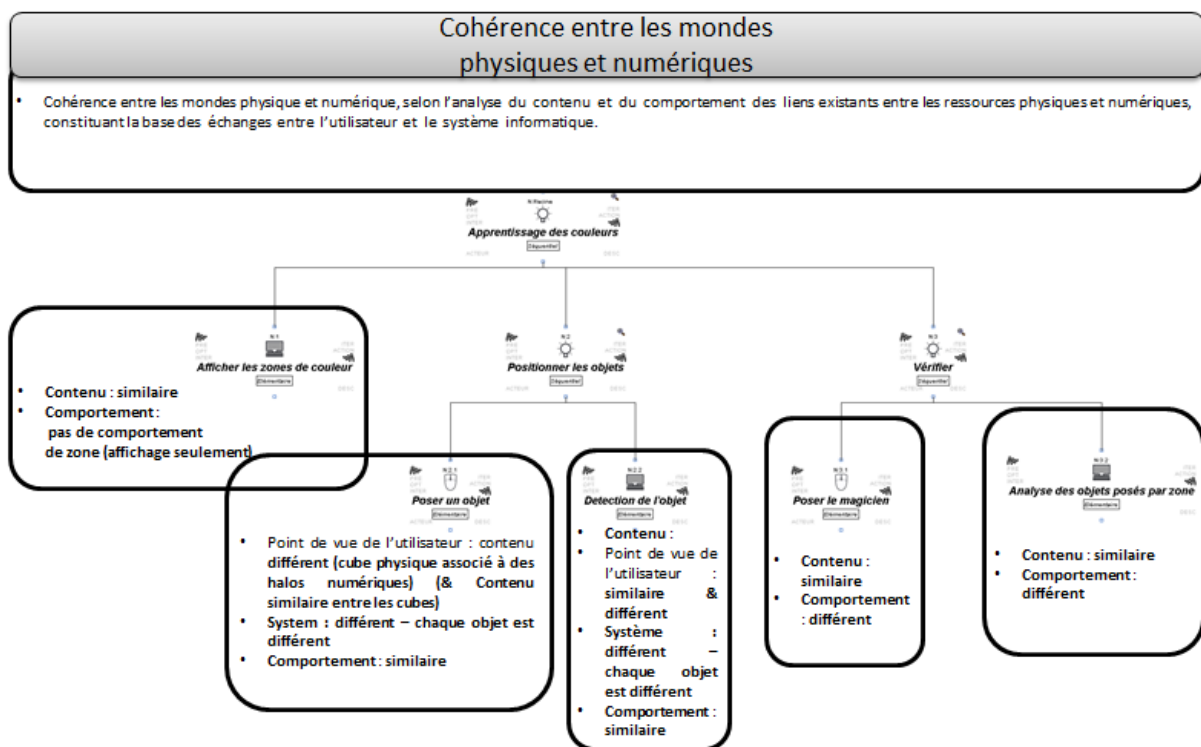


Figure 17. Cohérence des mondes physiques et numériques dans *TangiSense* pour l'application « apprentissage et reconnaissance des couleurs »



3.3.4 Conclusion sur *TangiSense*

Sur le plan technique, la particularité et l'innovation technologique de la table interactive *TangiSense* résident dans l'utilisation de la technologie RFID pour la détection des objets tangibles. Cette technologie possède de nombreux avantages par rapport à la vision par ordinateur (cf. Kubicki, 2011 - chapitre 1) utilisée principalement par les tables interactives. Parmi ces avantages, citons la résistance à toute condition lumineuse ainsi que la détection d'objets superposés (la technologie permet par exemple de détecter l'ensemble des objets pouvant être contenus dans un panier). Ces caractéristiques se sont d'ailleurs révélées profitables dans l'expérimentation de l'application « apprentissage et reconnaissance des couleurs » en école avec des enfants en bas âge (Kubicki et al., 2015).

Sur le plan conceptuel, le développement de l'application « apprentissage et reconnaissance des couleurs » a montré que les tables interactives pouvaient être utilisées dans différents domaines et que leurs avantages étaient particulièrement intéressants dans le domaine de l'éducation. Nous avons pu en effet, avec l'aide de professeurs des écoles, proposer des méthodes d'apprentissage innovantes pour des enfants en écoles maternelles où les formes, les objets, les chiffres et les nombres sont au programme de l'éducation nationale.

L'instanciation du cadre de référence pour la table interactive *TangiSense* met en évidence les avantages technologiques de la RFID. Nous remarquons par exemple que cette technologie permet l'identification d'objets, la détection de leur position et/ou de leur mouvement. Par ailleurs, le positionnement de *TangiSense* dans le cadre de référence met en évidence une limite de la table : les LEDs offrent un retour visuel de faible résolution nécessitant un dispositif externe, comme un vidéoprojecteur, si une « haute résolution » est requise. Ces limites ont été pour la plupart levées avec la nouvelle version de la table *TangiSense* v2 que nous présentons dans la section 4.

4 APPLICATIONS DISTRIBUEES SUR TABLES À INTERACTION TANGIBLE

Cette section présente deux applications distribuées : TangiSense V2 appliquée à la gestion de trafic routier comportant deux tables connectées utilisées par différents décideurs, et INDIGO comportant une table et d'autres dispositifs pour faciliter le processus collaboratif de gestion de crise au niveau stratégique.

4.1 TangiSense v2, pour la gestion de trafic routier

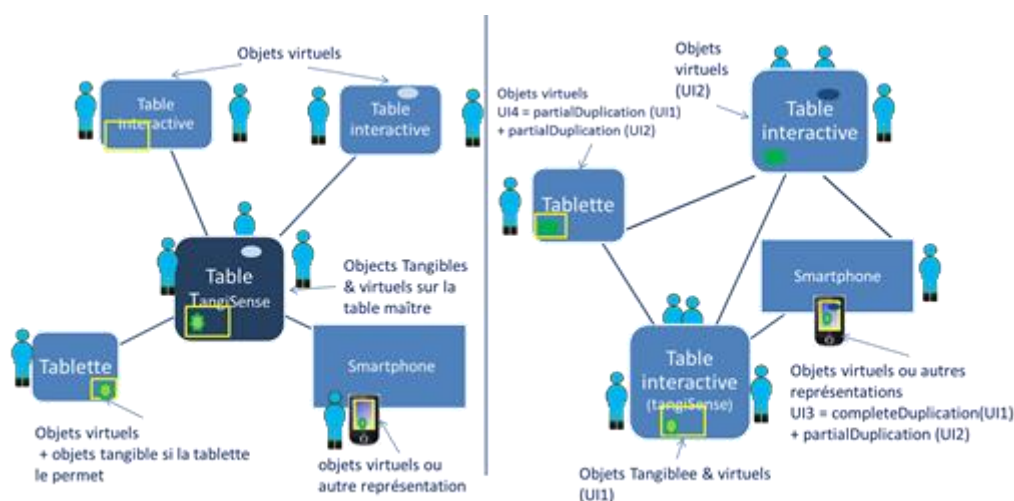
La gestion de trafic routier est notre première expérience d'utilisation de la table *TangiSense v2* dans un contexte distribué.

4.1.1 Description de la technologie de Tangisense v2

Les tables *TangiSense* exploitées dans un contexte distribué utilisent la nouvelle version (v2) avec écran HD intégré ; elles ont été développées par la société RFIdées dans le cadre du projet ANR IMAGIT. Un système multi-agent assure les communications entre les tables et autres dispositifs d'interaction : les agents représentant les tables communiquent afin de transmettre aux autres plates-formes connectées les interactions qui se déroulent en « local » (Lebrun et al., 2010 ; Garbay et al., 2012). Comme le montre la Figure 18, plusieurs solutions architecturales sont envisageables pour distribuer les interfaces utilisateurs entre les tables et d'autres plates-formes d'interaction (téléphones mobiles, laptops).

Des objets tangibles génériques, appelés Tangigets, servent de support à la collaboration à distance par objets tangibles (Caelen et al., 2011 ; Lepreux et al., 2012). Ces Tangigets se répartissent en six catégories : (1) les objets de contrôle dédiés à l'application, (2) les objets du contexte de l'application, (3) les objets de contrôle de l'interface utilisateur, (4) les objets de communication, (5) les objets de coordination et (6) les objets de création d'objets.

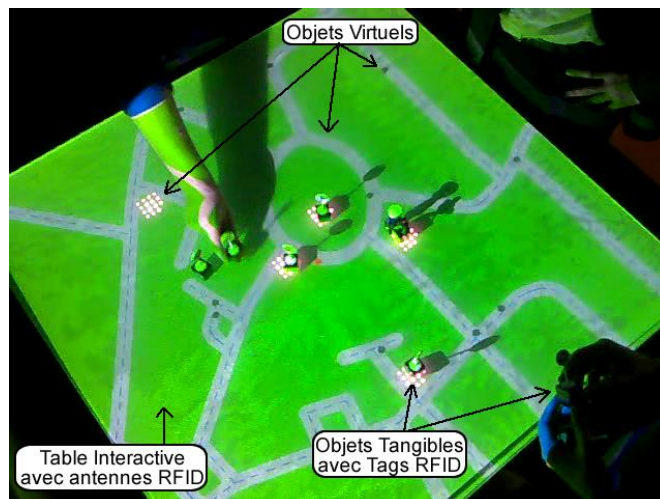
Figure 18. Distribution pilotée par la table maître de l'interface utilisateur (gauche) vs. Distribution en réseau (droite) (Lepreux et al., 2012) : les interfaces distribuées sont définies par les plates-formes « sources » (UI1, UI2, etc.) et sont composées dans les plates-formes cibles ; par exemple UI1 à droite est représentée par un cadre jaune et est composée dans UI4 et UI3.



4.1.2 Application de TangiSense V2 : gestion de trafic routier

L'objectif du simulateur développé dans le cadre de cette recherche est de permettre la coordination/collaboration entre différents types d'acteurs de manière distribuée sur au moins deux tables interactives de type *TangiSense v2* connectées (cf. Figure 20). Les acteurs interagissent sur la table à l'aide de tangigets dont certains sont utiles à la collaboration et d'autres à l'application de gestion de trafic qui existe par ailleurs en version centralisée sur *TangiSense* (Lebrun et al., 2010 ; Kubicki et al., 2013, cf. Figure 19). Des objets tangibles permettent de positionner ou modifier la signalisation et/ou les flux de circulation (objets stop, feux, limitation de vitesse, etc.) : les véhicules virtuels intégrés au trafic s'adaptent automatiquement à la présence des objets tangibles posés sur la table. En effet, la simulation à base d'agents prend en compte les modifications instantanément et donne directement un aperçu aux acteurs autour de la table (expert en sécurité, responsable des travaux, etc.).

Figure 19. Table interactive *TangiSense* utilisée dans un contexte collaboratif centralisé impliquant des objets tangibles et virtuels : simulation de trafic routier, cas d'affichage d'information par LEDs et vidéo-projection (Kubicki et al., 2013)



Le simulateur doit permettre aux différents acteurs de procéder à diverses simulations, de manière co-localisée ou à distance, afin de trouver une politique commune en matière de gestion des flux, de gestion de crise (par exemple, l'évacuation de zone) (Kolski et al., 2013).

Figure 20. Deux tables interactives de type *TangiSense v2* connectées utilisées dans un contexte collaboratif distribué impliquant des objets tangibles et virtuels : simulation de trafic routier (Kolski et al., 2013).



4.1.3 Positionnement de TangiSense V2 dans le cadre de référence

La Figure 21 montre le positionnement de TangiSense v2 dans le cadre de référence. Tout comme la table interactive *TangiSense*, la *TangiSense v2* exploite comme technologie en entrée principalement la RFID. En sortie, cette table a évolué vers un affichage à écran LED (le LCD n'était pas compatible avec la technologie RFID). Il est toujours possible de positionner des haut-parleurs mais ce n'est pas utilisé dans l'application présentée. Ces technologies permettent donc encore une fois des formes de communication visuelle, sonore et tangible.

Concernant la cohérence entre les espaces d'interaction, la Figure 22 montre que pour cette tâche de modification de feu de signalisation, les espaces en entrée sont identiques aux espaces en sortie (la plan de la ville). Il y a donc continuité et ce quel que soit le type de tâches (pour ce qui concerne les tâches interactives et automatiques, la tâche utilisateur ne provoquant pas d'interaction avec le SIM). Pour l'ensemble de ces tâches, l'attention reste faible.

Dans la Figure 23, nous remarquons que l'objet feu tricolore a plus de sens avec le monde physique que l'image collée sur un cube, disponible dans l'application d'apprentissage des couleurs en relation avec la TangiSense. Le choix d'objet pour cette application étant plus grand, la sémantique des objets était nécessaire. Indépendamment de la technologie, ce sont les applications (leur conception) qui influent sur les espaces de cohérence, à la fois sur la cohérence entre les espaces d'interaction et sur la cohérence entre les mondes physiques et numériques.

Figure 21. *TangiSense v2* dans le cadre de référence

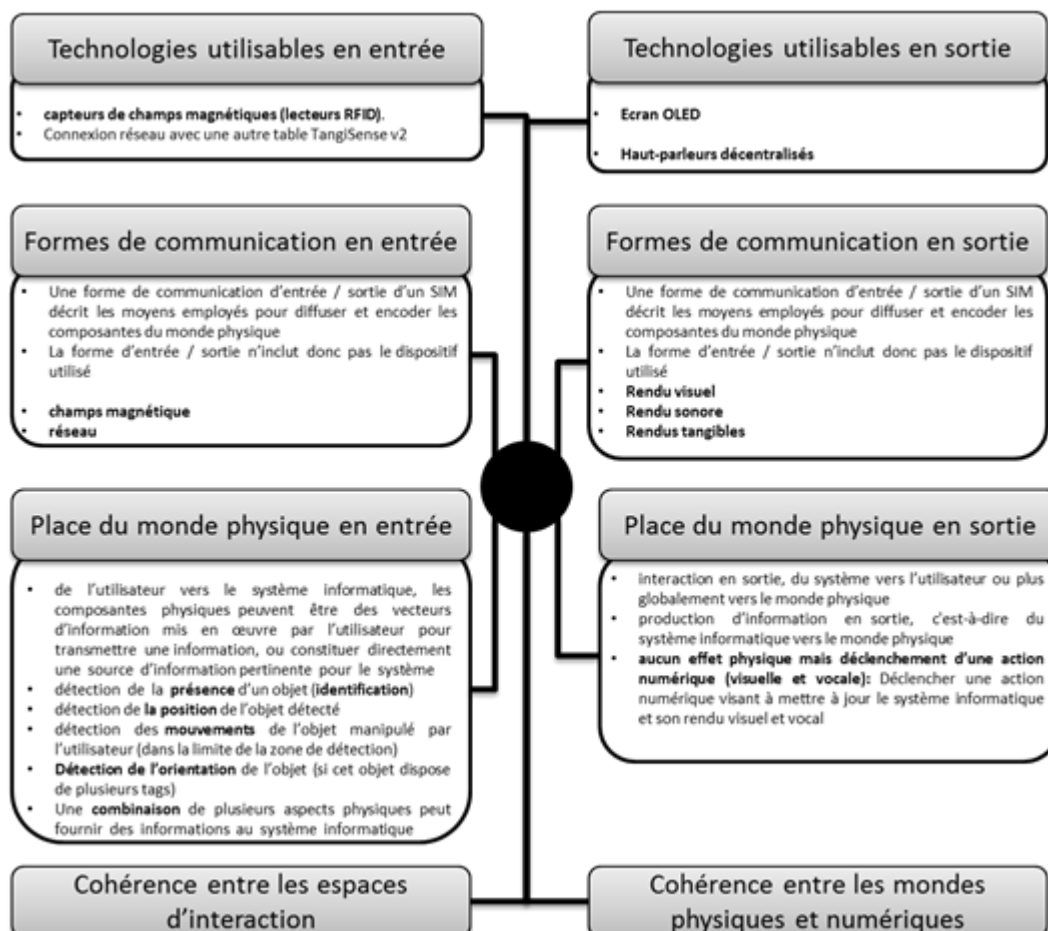


Figure 22. Cohérence entre les espaces d'interaction dans *TangiSense v2* pour l'application de gestion de trafic routier distribué

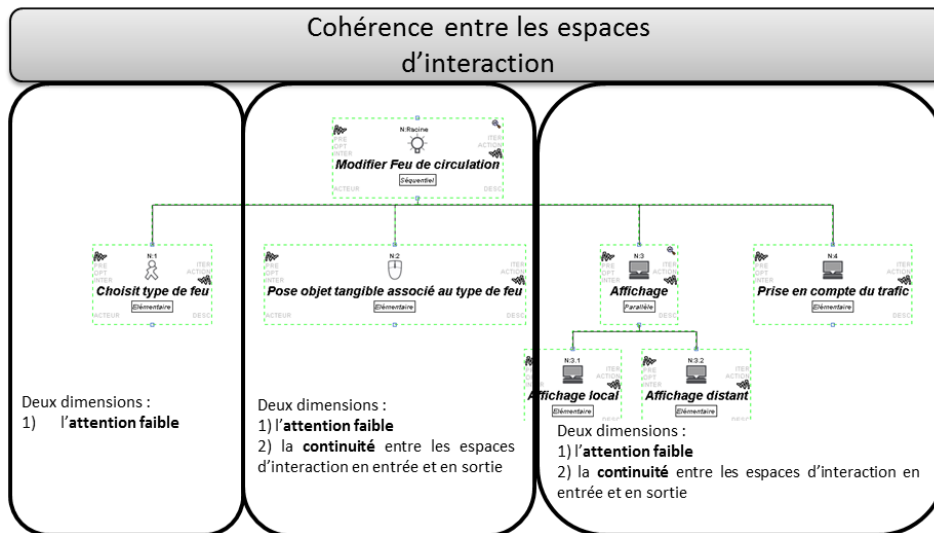
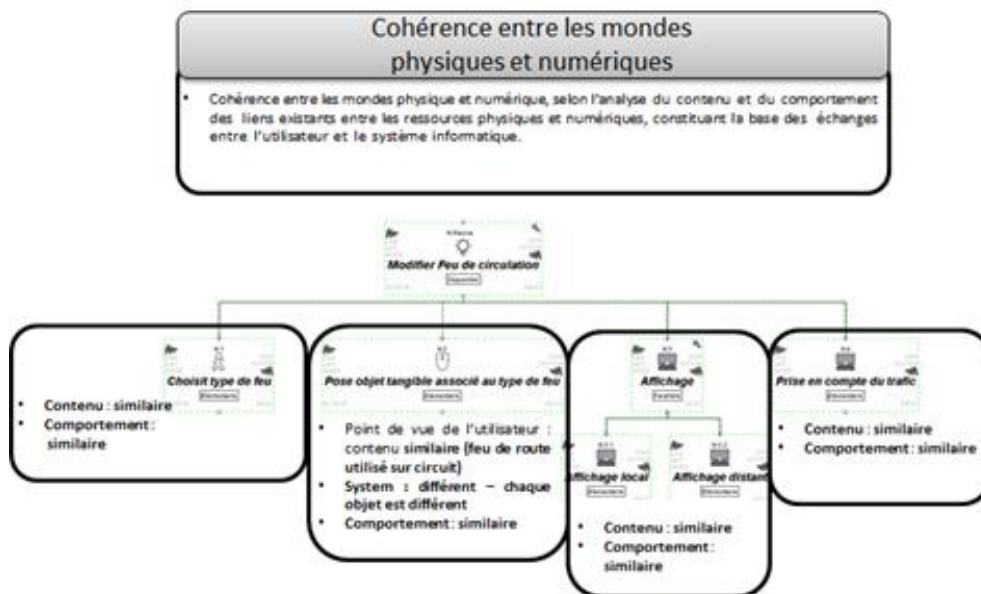


Figure 23. Cohérence des mondes physiques et numériques dans *TangiSense v2* pour l'application de gestion de trafic – tâche « modifier un feu tricolore »



4.1.4 Conclusion sur *TangiSense V2*

Selon une perspective technologique, la table interactive *TangiSense v2*, dans sa version avec écran HD intégré, associée à un ensemble d'objets tangibles a été utilisée afin de proposer une nouvelle forme de simulation. D'une part, l'apport de l'écran permet un affichage sans ombre à l'utilisateur (par rapport à la vidéoprojection utilisée en lien avec la *TangiSense v1*). Il permet de maintenir une cohérence entre le monde physique et le monde numérique (similaires dans les deux cas aussi bien en termes de contenu que de comportement par rapport à la version *TangiSense v1*). L'affichage d'un grand nombre d'informations dans un contexte collaboratif peut être risqué si l'information n'est pas affichée de manière lisible pour l'utilisateur concerné (par exemple, si l'orientation du texte est mal adaptée à la position de l'utilisateur) ou si l'information nécessaire à certains utilisateurs ne

doit pas être visible par d'autres. Ces préoccupations ne rentrent pas dans le cadre du travail présenté dans cet article. L'application a été adaptée dans un contexte distribué sur plusieurs tables interactives (dans notre cas : deux tables pour l'instant), avec actions simultanées de plusieurs groupes d'acteurs sur la même application. La technologie RFID rend possible le suivi des objets et la transmission de l'information, ce qui permet via un système multi-agent (SMA) de gérer les objets (et les actions associées) et le contexte d'interaction pour un affichage adéquat (Garbay et al., 2012 ; Lebrun et al., 2013).

Selon une perspective conceptuelle, les objets tangibles détectés par la table peuvent être utilisés et manipulés par chaque groupe d'utilisateurs qui peuvent être des décideurs, coopérant ensemble autour d'un problème donné (ex. analyse d'un problème à résoudre, contribuant à la gestion de crise). Le SMA peut être utilisé dans toute application combinant des applications distribuées et des objets tangibles. Il permet de combiner des rôles différents pour les agents responsables de la gestion des objets virtuels et/ou des objets tangibles. Ce simulateur permet à différents utilisateurs de travailler ensemble (en coopération) sur la table en manipulant directement les objets physiques de l'infrastructure routière, qui sont une partie des composants tangibles de la simulation (ex. feux tricolores, panneaux de signalisation, etc.).

Le cadre de référence a été utilisé pour une sous-tâche de l'application qui a pour particularité d'avoir des conséquences en local (sur la table où l'objet est posé) mais aussi sur la simulation ; il peut donc, si le focus de la seconde table est sur cette zone géographique, avoir des répercussions sur l'affichage de la table distante. Le cadre permet bien de montrer la continuité entre les espaces et plus globalement de montrer les choix de conception pour ce type de tâches (réalisées à l'aide d'un objet en interaction sur une zone précise). Le positionnement dans le cadre de référence a permis de montrer les particularités techniques du système utilisé (table *TangiSense* v2 et objets tangibles). Le cadre - en particulier la cohérence entre les espaces d'interaction et la cohérence entre les mondes physiques et numériques - permet de montrer les choix de conception de l'application en lien avec la technologie.

4.2 INDIGO : Gestion de crise au niveau stratégique

Dans INDIGO, la table et les différentes techniques d'interaction associées à un processus collaboratif de gestion de crise ont été mises en œuvre pour faciliter des réunions au niveau stratégique avec un large spectre de profils utilisateurs allant de l'expert en technologie à l'utilisateur inexpérimenté. Elles constituent le résultat d'une recherche technologique et ergonomique poussées pour répondre aux requis d'experts en gestion de crise. L'aspect multi-profil est un des points sensibles du projet. Pour favoriser son utilisation dans un contexte réel, où les niveaux hiérarchiques ainsi que les niveaux d'expertise en technologie se croisent, il était indispensable d'offrir aux utilisateurs une interface intuitive. Au-delà des limites de cette intuitivité, des vecteurs d'apprentissage devaient être mis à disposition des utilisateurs les plus réticents afin qu'ils puissent passer outre les appréhensions que peuvent susciter ce type de nouvelles technologies. Pour conclure, à la lumière d'évaluations en situation réelle, il est apparu que la combinaison des modalités tangible et tactile a été la réponse efficace à cette problématique.

La table interactive *iLight* a été conçue et développée par Immersion SAS et en partie financée par le septième programme-cadre de l'Union Européenne (FP7) dans le cadre du projet INDIGO (Ahmad et al., 2012). Ce projet avait pour objectif de concevoir, développer et valider un environnement collaboratif innovant intégrant les dernières avancées en matière de réalité virtuelle et de simulation afin d'homogénéiser et d'améliorer la gestion d'une crise réelle complexe (voir Figure 24). Parmi ses principales caractéristiques, le système permet une visualisation interactive de la crise par la mise à disposition, au cœur d'un même environnement collaboratif, de données en provenance du terrain et de simulations. Ainsi, dans cet environnement, les responsables stratégiques de différents services (pompiers, politique, police) peuvent rapidement prendre des décisions critiques grâce à l'intégration

des différentes informations au sein d'un unique système. L'image opérationnelle commune est au cœur de la gestion de crise. La tâche principale associée à ce cas d'usage est donc la visualisation, la manipulation, et l'annotation de cartes 2D et 3D.

Figure 24. Environnement collaboratif pour la gestion de crise dans INDIGO



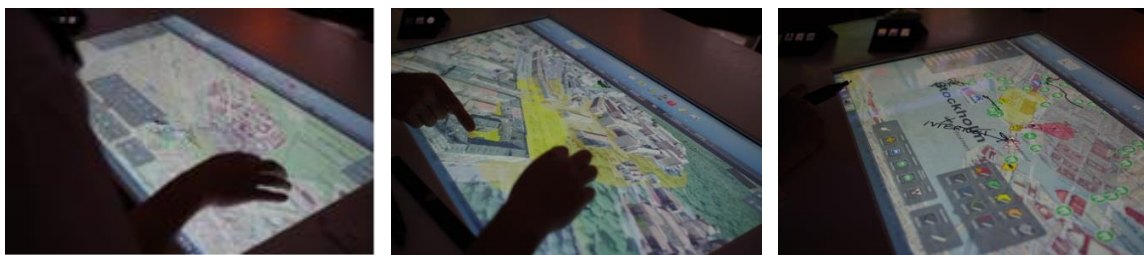
4.2.1 Description de la technologie d'INDIGO

L'environnement d'INDIGO est organisé autour d'une table tactile multipoint conçue pour offrir un espace cohérent avec la tenue d'une réunion en termes d'ergonomie et de confort. Pour une question de flexibilité en entrée et en sortie, cet environnement permet le partage instantané des écrans d'un ou plusieurs dispositifs personnels sur un écran disposé à côté de la table. La table mesure 1,6m par 1m et possède toutes les caractéristiques pour en assurer la stabilité malgré les nombreux utilisateurs présents autour de la table avec leurs dispositifs personnels. La gestion du tactile est conçue à partir d'une Microsoft Surface 2 de 40 pouces et des solutions gestuelles *light* commercialisées par Immersion.

4.2.2 Application d'INDIGO : gestion de crise

L'intégration des technologies citées précédemment a permis la mise en œuvre d'une interaction pour la composition cohérente de translations, rotations et zooms homogènes sur les représentations 2D et 3D de zone de crise (voir Figure 25).

Figure 25. Visualisation, Manipulation et Annotation des cartes 2D/3D dans INDIGO



La table tactile dispose également d'objets tangibles permettant d'améliorer l'expérience utilisateur : une règle, un stylo et des boutons (cf. Figure 26). La règle et le stylo ont été conçus pour être compatibles avec la technologie infra-rouge des surfaces de Microsoft puisqu'aucune solution de ce type n'est à ce jour disponible. La mise en œuvre de ces solutions et des métaphores d'interaction qui les accompagnent ont été motivées par les contraintes d'intuitivité soulignées par les utilisateurs. Comme pour le projet GeoTUI décrit précédemment, par leur affordance (Norman, 1999) et leur familiarité visuelle, les objets tangibles sont apparus comme un moyen de provoquer la prise en main du système et au-delà, d'offrir un moyen de conserver les habitudes associées au processus de gestion de crise. En effet, les observations menées auprès des experts ont montré là encore que des outils comme la règle ou le stylo sont toujours au cœur des procédés de réflexion et de prise de décision autour d'une carte. Les efforts associés à ces deux premiers objets tangibles ont été de garantir une communication robuste avec le système. Des efforts plus spécifiques ont également été menés comme la métaphore basée sur la « rature » pour effacer certains

tracés avec le stylo. Pour la règle, une contribution importante a été de développer une graduation qui s'adapte dynamiquement à l'échelle du contenu numérique. Afin de garantir un usage flexible de ces deux outils, leur conception a été réalisée en sorte de permettre leur utilisation combinée (par exemple, l'annotation d'une zone de sécurité de 2 km de large autour d'un endroit stratégique pour la gestion de crise). Finalement, une solution de type boutons interactifs physiques a également été conçue et produite dans cette même volonté. Ces derniers permettent à l'utilisateur d'accéder très facilement à des fonctions traditionnelles comme l'impression, le tableau blanc ou encore faire apparaître le clavier numérique sans avoir à passer par la modalité tactile. Ils permettent également d'améliorer l'expérience utilisateur en lui offrant la possibilité de sauvegarder des points de vue dans l'environnement 2D et 3D. Ainsi, les utilisateurs peuvent construire leur réflexion à plusieurs échelles et les faire évoluer rapidement en faisant référence à ces différentes échelles.

Figure 26. Solutions tangibles connectées à la table interactive d'INDIGO (stylo, règle, et boutons)



Les fonctions de la table interactive, comme les boutons (voir Figure 27), ont également été mises en œuvre sur un tableau interactif. Ce tableau a pour vocation de gérer un processus d'organisation moins collaboratif qu'avec la table. Il a été utilisé pour des séances de récapitulation (« debriefing ») ou pour observer et commenter les prises de décision au cours de la crise.

Figure 27. Système du tableau interactif pour le niveau opérationnel dans INDIGO

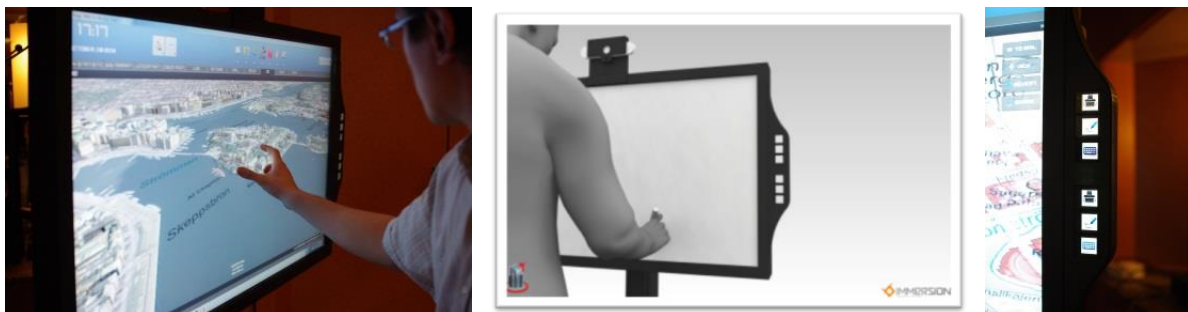
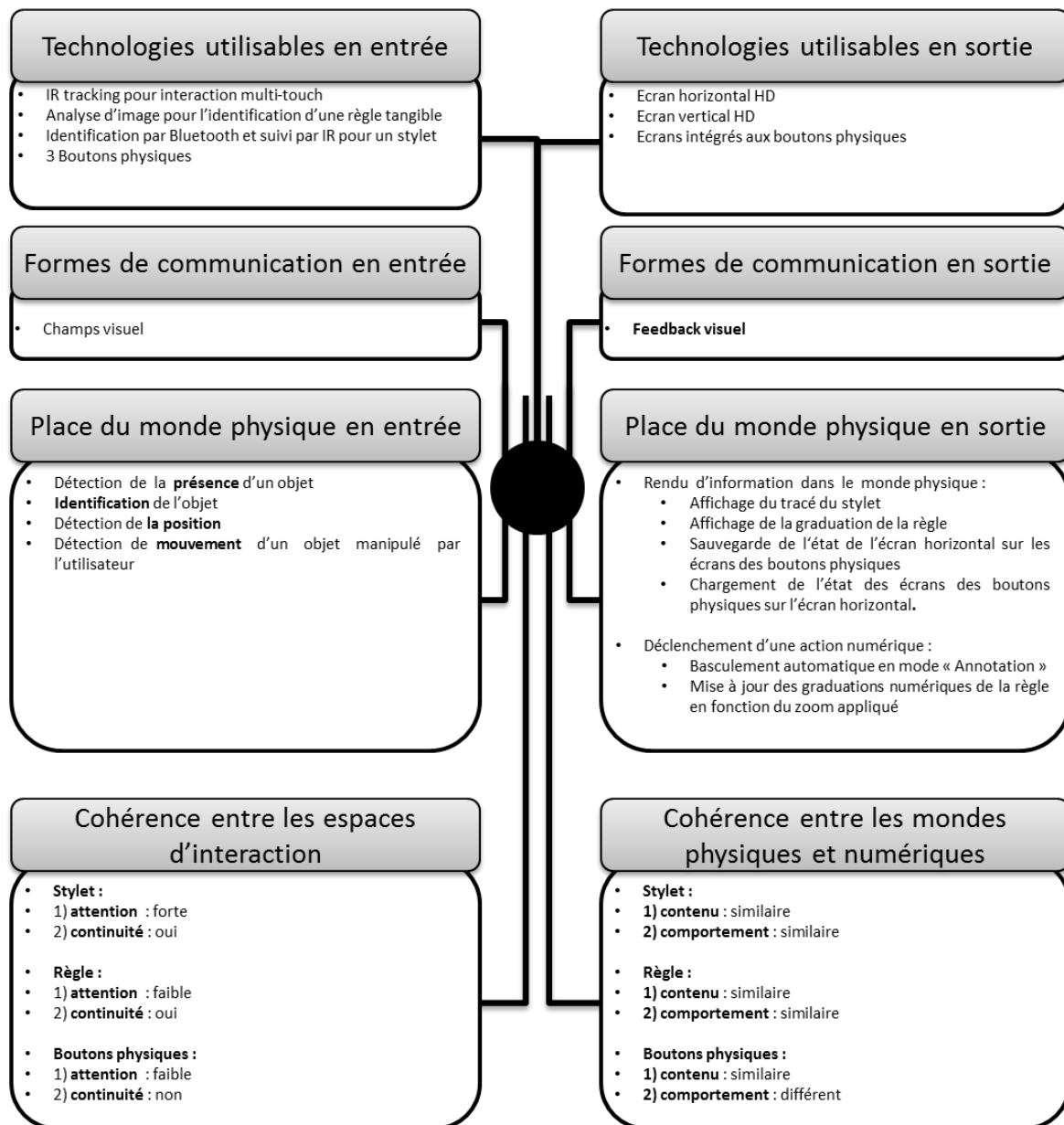


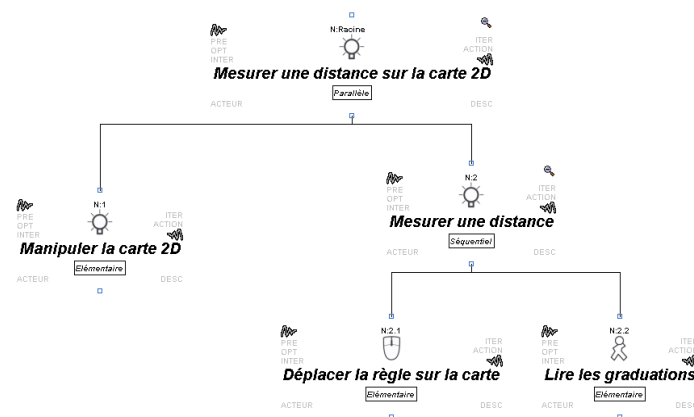
Figure 28. INDIGO dans le cadre de référence



4.2.3 Positionnement d'INDIGO dans le cadre de référence

La Figure 28 montre le positionnement d'INDIGO dans le cadre de référence. Nous remarquons que des technologies très différentes sont ici combinées en entrée, tels que l'IR, l'analyse d'image et l'utilisation d'un boîtier. L'arbre des tâches associé à l'utilisation de la règle est vu en Figure 29. Il y a pour chacune des sous-tâches continuité des espaces en entrée et sortie et l'attention demandée est faible. Le système prend en compte le niveau de zoom de l'affichage afin d'augmenter la règle d'une graduation cohérente ; la continuité est donc maintenue.

Figure 29. Analyse de la tâche “Mesurer une distance” avec la règle tangible dans INDIGO



4.2.4 Conclusion sur INDIGO

Sur le plan technique, la table INDIGO a la particularité de proposer un ensemble fini d'objets physiques qui répondent à des besoins liés à la manipulation de système d'information géographique. INDIGO ne présente pas de méthode générique permettant d'intégrer l'objet selon une interface homogène. Le projet avait pour objectif de proposer une boîte à outils dont le seul défi de conception était l'utilisation par des non-experts. Le résultat est donc basé sur des briques technologiques hétérogènes mélangeant marqueurs visuels, suivi infrarouge, écran déporté et boutons physiques.

Sur le plan conceptuel, INDIGO a la particularité d'être un projet de recherche sur la thématique de la gestion de crise. Il s'agissait de fournir une table interactive pouvant accueillir des réunions de crise et améliorer les prises de décision. Cette spécificité implique d'importantes contraintes de robustesse au regard des conditions extrêmes de ces sessions de travail (stress, temps limité, enjeux importants). Les itérations avec les utilisateurs ont montré que les objets tangibles avaient pour principal avantage de rompre la barrière préexistante entre le personnel technique généralement dédié à la manipulation des outils numériques et le personnel stratégique généralement focalisé sur la prise de décision. En engageant l'ensemble des acteurs, les objets tangibles ont permis de faire de l'outil numérique un moyen d'échanger, de construire et d'expérimenter. Le positionnement d'INDIGO dans le cadre de référence a permis de mettre en évidence que la simplicité d'utilisation n'était pas nécessairement liée à l'homogénéité technique.

5 DISCUSSION

Le cadre de référence destiné initialement pour les Systèmes Interactifs Mixtes a montré son utilité pour prendre de la hauteur par rétro-ingénierie, par rapport à différents types de systèmes sur table interactive, exploitant la tangibilité, aussi bien dans le cas d'une seule table, que de plusieurs tables connectées. Il est ainsi possible de décrire la manière dont s'intègre le monde physique, aussi bien en entrée et en sortie du système interactif. De plus, les tâches représentatives qui doivent être réalisées à l'aide du système peuvent également être positionnées, permettant ainsi de montrer la cohérence entre les mondes physiques et numériques. De même qu'entre les espaces d'interaction. Ce modèle peut donc être d'un apport efficace pour l'analyse et la spécification de systèmes à interaction tangible. D'autre part ce modèle peut être utilisé dans une démarche de comparaison de systèmes ou d'alternative de conception en mettant en évidence à la fois les technologies en entrée et en sortie et les formes de communication. Avec l'apport de l'analyse des tâches dans le modèle initialement proposé, le modèle enrichi fournit une cohérence entre les modèles d'analyse et de conception des IHM. Cette intégration apporte un gain en analyse de l'usage et les impacts sur l'interaction peuvent être décrits de manière plus fine.

Un tel modèle permet donc de progresser dans les démarches méthodologiques liées à l'analyse et la conception de l'interaction tangible sur table interactive.

En prenant de la hauteur sur chaque système à l'aide du cadre, nous nous sommes rendus compte qu'il permet de détecter des forces et des faiblesses :

- par exemple dans GeoTUI, l'attention portée au dispositif d'interaction en entrée, lorsque la règle était manipulée directement sur la carte vidéo-projetée, a été qualifiée de faible, et ceci avait été vérifié lors d'expérimentations (Couture et al., 2008). Le modèle pourrait permettre d'estimer certaines caractéristiques a priori à la conception.

- De même dans TangiSense v1, l'instanciation aurait permis de mettre en évidence les limites de la plateforme, comme par exemple un unique retour visuel à l'aide de LEDs (résolution faible).

- D'autre part, nous avons noté dans l'application de planification urbaine que la cohérence entre le monde physique et numérique ne peut être assurée pour la modification des éléments urbains puisque les objets en bois ne peuvent changer de forme physique ; ainsi les objets déformables, voire auto-formables, sont une autre piste de recherche dans le contexte de l'interaction tangible. Voir à ce sujet les travaux de Coutrix et ses collègues (Robinson et al., 2016).

Le modèle semble donc pouvoir contribuer à l'évaluation préliminaire des systèmes à interaction tangible, durant les phases d'analyse et de conception. C'est un point qu'il s'agirait de vérifier plus en profondeur lors d'études complémentaires, faisant l'objet d'une de nos perspectives de recherche.

Après exploitation du cadre sur des systèmes très différents, il apparaît que la notion de contexte d'exploitation pourrait y être plus finement considéré/visualisé, dans le cas où pour le même système, le passage d'un état à un autre entraîne par exemple des nécessités différentes en terme d'attention.

Lors de la mise en œuvre du cadre de référence, celui-ci a montré une faiblesse liée à la description d'un système complet (axes impliqués : (1) cohérence entre les espaces d'interaction et (2) cohérence entre les mondes physiques et numériques). C'est pourquoi nous avons choisi de décomposer chaque système en un ou plusieurs arbres de tâches et de présenter dans cet article une description d'une tâche représentative impliquant numérique et tangible.

6 CONCLUSION

Cet article se positionne par rapport aux interfaces tangibles, faisant l'objet d'un vaste courant de recherche, aussi bien au niveau international que national. Un cadre de référence a été exploité dans l'article, celui proposé par (Dubois, 2009). Il a été choisi dans la mesure où il fournit des axes de variabilité pour des Systèmes Interactifs Mixtes (SIM). Rappelons que, selon cet auteur, un SIM tire profit des capacités de stockage, rendu et transformation de données numériques par un système informatique et facilite l'intégration et l'exploitation des aptitudes physiques et habitudes de l'utilisateur, ainsi que des ressources physiques présentes dans son environnement d'interaction. Comme précisé dans la section 2, les applications visées dans cet article, fonctionnant sur table interactive avec objets tangibles, peuvent être considérées comme des systèmes mixtes, exploitant explicitement éléments numériques et tangibles.

Un certain nombre de travaux de recherche, issus de la communauté francophone en Interaction Homme-Machine et illustratifs du domaine, exploitant des interactions tangibles sur table interactive, a alors été présenté. Pour chacun de ces travaux, la technologie proposée a été décrite, de même que sa mise en œuvre sur une application afin de valider

les principes (modèles et/ou conception) liés aux enjeux introduits. De plus, chacun d'entre eux a été positionné par rapport au cadre de référence, qui a montré son pouvoir descriptif selon chacun de ses axes.

Les trois premiers travaux décrits correspondent à des applications centralisées (focalisation sur une table avec objets tangibles) :

- La *ColorTable* a été exploitée dans un cadre de planification urbaine, pour supporter des situations de travail collaboratif impliquant des équipes de conception multidisciplinaires.
- GeoTUI, dispositif tangible, a montré son intérêt dans des applications de géosciences et a permis de valider l'usage d'une règle et de boutons pour des découpes dans le sous-sol.
- Une autre table interactive, nommée *TangiSense*, a été introduite ; une de ses applications concerne l'apprentissage dédié à de très jeunes enfants (3 à 5 ans).

Les deux derniers travaux décrits correspondent à des applications distribuées. De nouveaux défis découlent d'un tel cadre :

- Une application de simulation de trafic routier, existante en version centralisée, a été illustrée en distribué sur une version évoluée de la table *TangiSense* (cas de deux tables connectées). Dans ces travaux les objets utilisés sont soit génériques, soit dédiés à l'application métier. Dans les deux cas ils sont conçus pour être abordables pour les utilisateurs.
- L'application INDIGO a été utilisée avec une visée de gestion de crise au niveau stratégique. Pour cette application, une table tactile est couplée à des dispositifs tangibles (boutons, stylets, règles) afin de fournir des fonctionnalités génériques.

Il ressort en premier lieu que les tables tangibles répondent à de nombreux cas d'usages et d'activités déjà pratiquées spontanément sur une table. En allant plus loin, la configuration même des surfaces interactives doit être étudiée en fonction de l'activité pratiquée.

Les perspectives des travaux évoqués sont nombreuses et augmenteront encore avec l'introduction progressive des tables interactives dans le domaine public. Ainsi l'arrivée des objets tangibles interagissant avec des tablettes (voir par exemple le jeu *Appmates*⁶ qui permet à un enfant de rouler avec une voiture objet sur un *iPad*) montre un intérêt pour ces recherches même s'il manque encore dans de tels produits à surface restreinte la possibilité de collaboration qui est plus aisée par les tables ayant une plus grande surface. L'interaction avec des objets mobiles de type robots fait l'objet d'autres perspectives. Les objets ne seraient plus statiques mais pourraient faire des retours (interaction de sortie) à l'utilisateur. Dans le cadre d'applications distribuées, ces robots permettraient de maintenir une consistance entre les tables distantes. Pour finir, il reste encore de nombreuses perspectives sous l'angle de l'analyse, de la conception et de l'évaluation de tels systèmes, aussi bien dans le cadre d'interactions centralisées que distribuées.

LES PERSPECTIVES D'APPLICATION DE CETTE RECHERCHE :

- ✓ Conception d'applications à interaction tangible
- ✓ Catégorisation d'applications à interaction tangible

7 REMERCIEMENTS

Cet article a été rédigé dans le cadre du Groupe de Travail TANGINT/FR soutenu par l'AFIHM. Certains de ces travaux sont par ailleurs financés par différents organismes : le ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche, la région Nord/Pas-de-Calais, la région Aquitaine, l'ACBA, le CNRS, l'Europe (FEDER, FP6 et FP7), le CISIT et l'ANR. Les auteurs remercient les relecteurs anonymes pour leurs nombreuses remarques pertinentes, de même que les éditeurs en chef de la revue JIPS pour leur soutien.

⁶ <http://www.appmatestoy.com/>

8 REFERENCES

- ▶ Adam, E., Grislis Le-Strugeon, E., And Mandiau, R. 2008. Flexible hierarchical organisation of role based agents. In Proceedings of the Second IEEE International Conference on Self-Adaptive and Self-Organizing Systems Workshops (SASOW '08), pp. 186–191.
- ▶ Ahmad, A., Balet, O., Boin, A., Brivio, P., Ganovelli, F., Gobetti, E., Himmerlstein, J., Pintore, G., de la Rivière, J.B., and Schraap, M. 2012. Interactive simulation technology for crisis management and training: the Indigo Project. In Proceedings of the 9th international ISCRAM Conference, pp.144–149.
- ▶ Baron, M., Lucquiaud, V., Autard, D. and Scapin, D. K-MADe : un environnement pour le noyau du modèle de description de l'activité, 18ème Conférence Francophone sur l'Interaction Homme-Machine (IHM'2006), édité par ACM Press, Montréal, 2006, pp. 287-288.
- ▶ Broll, W., Lindt, I., Ohlenburg, J., Wittkämper, M., Chunrong, Y., and Novotny, T. 2004. Arthur: a collaborative augmented environment for architectural design and urban planning. J. Virtual Real. Broadcast, 1, 1.
- ▶ Caelen, J., and Perrot, C. 2011. Bibliothèques d'objets. Rapport de projet ANR IMAGIT (rapport 1), LIG, Grenoble.
- ▶ Caffiau, S., Scapin, D., Sanou, L., and Guittet, L. 2010. Using K-MADe for learning task modeling: Interest and Difficulties. Journal d'Interaction Personne-Système 1(1), 4:1–4:28.
- ▶ Couture, N., Rivière, G., and Reuter, P. 2008. GeoTUI: A Tangible User Interface for Geoscience. In Proceedings of the 2nd International Conference on Tangible and Embedded Interaction (TEI'08), ACM Press, pp. 89–96.
- ▶ Dillenbourg, P., and Evans, M. 2011. Interactive tabletops in education. I. J. Computer-Supported Collaborative Learning 6(4): 491–514.
- ▶ Do-Lenh, S., Jermann, P., Cuendet, S., Zufferey, G., and Dillenbourg, P. 2010. Task Performance vs. Learning Outcomes: A Study of a Tangible User Interface in the Classroom. EC-TEL, Barcelona, Spain, pp. 78–92.
- ▶ Dubois, E. 2009. Conception, Implémentation et Evaluation de Systèmes Interactifs Mixtes : une Approche basée Modèles et centrée sur l'Interaction. Habilitation à Diriger les Recherches, Université de Toulouse, Mémoire.
- ▶ Fjeld, M., Ironmonger, N., Guttormsen Schär, S. and Krueger, H. 2001. Design and Evaluation of Four AR Navigation Tools Using Scene and Viewpoint Handling. In proceedings of INTERACT, Tokyo, Japan, pp. 214-223.
- ▶ Fyhri, A., Bjørnskau, T., and Ulleberg, P. 2004. Traffic education for children with a tabletop model. Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour 7 (4-5), 197–207.
- ▶ Garbay, C., Badeig, F., and Caelen, J. 2012. Normative multi-agent approach to support collaborative work in distributed tangible environments. In: Steven E. Poltrock, Carla Simone, Jonathan Grudin, Gloria Mark, John Riedl (Eds.), Proceedings of the conference on Computer Supported Cooperative Work (CSCW '12), ACM, pp. 83–86.
- ▶ Ishii, H., Underkoffler, J., Chak, D., Piper, B., Ben-Joseph, E., Yeung, L., and Kanji, Z. 2002. Augmented urban planning workbench: overlaying drawings, physical models and digital simulation. In Proceedings of the 1st int. symposium on mixed and augmented reality, IEEE Computer Society, pp. 203–211.
- ▶ Ishii, H., Ratti, C., Piper, B., Wang, Y., Biderman, A., and Ben-Joseph, E. 2004. Bringing clay and sand into digital design - continuous tangible user interfaces, BT Technology Journal 22, 287–299.
- ▶ Jurado, F., Sinoquet, D., and Lailly, P. 1996. Jerry: a 3D reflection tomography designed for complex structures, in 'KIM 1996 Annual Report', Institut Français du Pétrole, Pau, France.
- ▶ Kharrufa, A., Balaam, M., Heslop, P., Leat, D., Dolan, P., and Olivier, P. 2013. Tables in the Wild: Lessons Learned from a Large-Scale Multi-Tabletop Deployment. In Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI 2013), ACM, pp. 1021–1030.

- ▶ Kolski, C., Lebrun, Y., Rajaonah, B., Lepreux, S., and Mandiau, R. 2013. Interactive tabletops as new supports for collective diagnosis?. In E. Brandenburg, L. Doria, A. Gross, T. Günzler, H. Smieszek (Eds.), *Foundations and Applications of Human-Machine Interaction, 10th Workshop on Human-Machine Systems (10-12 October 2013)*, Berlin, Germany, pp. 167–172, ISBN 978-3-7983-2624-8.
- ▶ Kubicki, S., Borgiel, K., Lepreux, S., Wolff, M., and Kolski, C. 2012a. Réflexions autour des tables interactives : expérience utilisateur, utilisabilité, évaluation. *Le Travail Humain*, 75 (3), pp. 229–252.
- ▶ Kubicki, S., Lepreux, S., and Kolski, C. 2011. Evaluation of an interactive table with tangible objects: Application with children in a classroom. In *Proceedings of the 2nd Workshop on Child Computer Interaction "UI Technologies and Educational Pedagogy"*, at CHI'2011, Vancouver, Canada, may.
- ▶ Kubicki, S., Lebrun, Y., Lepreux, S., Adam, E., Kolski, C., and Mandiau, R. 2013. Simulation in contexts involving an interactive table and tangible objects. *Simulation Modelling Practice and Theory* 31: 116-131, 2013.
- ▶ Kubicki, S., Lepreux, S., And Kolski, C. 2012b. RFID-driven situation awareness on TangiSense, a table interacting with tangible objects. *Personal and Ubiquitous Computing* 16(8): 1079-1094, 2012.
- ▶ Kubicki, S., Wolff, M., Lepreux, S., Kolski, C. 2015. RFID interactive tabletop application with tangible objects: exploratory study to observe young children' behaviors. *Personal and Ubiquitous Computing* 19(8), pp. 1259-1274.
- ▶ Kubicki, S. 2011. Contribution à la prise en considération du contexte dans la conception de tables interactives sous l'angle de l'IHM, application à des contextes impliquant table interactive RFID et objets tangibles, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, 02 Décembre 2011, Valenciennes, France.
- ▶ Labrune, J.B., and Mackay, W.E. 2005. Tangicam: exploring observation tools for children. *Proceedings of the 2005 conference on Interaction design and children, IDC 2005*, Boulder, Colorado, June 8-10, ACM, 95–102.
- ▶ Larousse. 2013. Dictionnaire de la langue Française <http://www.larousse.fr/dictionnaires/francais>.
- ▶ Lebrun, Y., Adam, E., Kubicki, S., and Mandiau, R. 2010. A Multi-agent System Approach for Interactive Table Using RFID. Y. Demazeau, F. Dignum, J.M. Corchado & J.B. Perez (Eds.), 8th International Conference on Practical Applications of Agents and Multi-Agent Systems (PAAMS 2010), Springer Berlin/Heidelberg, *Advances in Intelligent and Soft-Computing, Advances in Practical Applications of Agents and Multiagent Systems*, Vol. 70, pp. 125–134.
- ▶ Lebrun, Y., Adam, E., Mandiau, R., and Kolski, C. 2013. Interaction between tangible and virtual agents on interactive tables: Principles and case study. E. Shakshuki, K. Djouani, M. Sheng, M. Younis, E. Vaz, W. Groszko (Eds.), *The 4th International Conference on Ambient Systems, Networks and Technologies (June 25-28, Halifax, Nova Scotia, Canada)*, Elsevier, pp. 32–39.
- ▶ Lepreux, S., Castet, J., Couture, N., Dubois, E., Kolski, C. Kubicki, S., Maquil, V., and Rivière, G. 2016. Interaction Tangible sur Table, définitions et modèles. *Journal d'Interaction Personne-Système*, Volume 5, numéro 2, pp. 1-21.
- ▶ Lepreux, S., Kubicki, S., Kolski, C., and Caelen, J. 2012. From Centralized interactive tabletops to Distributed surfaces: the Tangiget concept. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 28, pp. 709–721.
- ▶ Maquil, V., Psik, T., and Wagner, I. 2008. The ColorTable: a design story. In *Proceedings of the 2nd international conference on Tangible and Embedded Interaction (TEI'08)*, ACM, pp. 97–104.
- ▶ Maquil, V. 2015. Towards Understanding the Design Space of Tangible User Interfaces for Collaborative Urban Planning. In *Interacting with Computers 2015*, doi: 10.1093/iwc/iwv005.
- ▶ Norman, D. 1999. Affordance, conventions, and design, *Interactions* 6(3), 38–43.
- ▶ Piper, B., and Ratti, C. 2002. Illuminating clay: a 3-D tangible interface for landscape analysis. *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems (CHI'02)*, ACM, pp. 355–362.

- ▶ Rauterberg, M., Fjeld, M., Krueger, H., Bichsel, M., Leonhardt, U., and Meier, M. 1998. BUILD-IT: A Planning Tool for Construction and Design. In the video program of CHI'98, pp. 177–178.
- ▶ Rivière, G., and Couture, N. 2007. Etude d'interacteurs pour la sélection d'une ligne de coupe depuis une carte, In Actes de la 19ème Conférence Francophone sur l'Interaction Homme-Machine (IHM'07), Démonstrations ACM Press, pp. 299–302.
- ▶ Rivière, G., Borgiel, K., and Couture, N. 2011. Les Cartouches, un concept d'interfaces tangibles, appliquées à l'apprentissage des jeunes enfants. Atelier « Interfaces avancées pour l'apprentissage », Cinquième édition de la conférence Environnements Informatiques pour l'Apprentissage Humain.
- ▶ Robinson, S., Coutrix, C., Pearson, J., Rosso, J., Torquato, M.F., Nigay L., Jones, M. 2016: Emergeables: Deformable Displays for Continuous Eyes-Free Mobile Interaction. In Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems(CHI 2016), pp. 3793-3805
- ▶ Schnädelbach, H., Koleva, B., Flinham, M., Fraser, M., Izadi, S., Chandler, P., Foster, M., Benford, S., Greenhalgh, C., and Rodden, T. 2002. The augurscope: a mixed reality interface for outdoors. In Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '02). ACM, New York, NY, USA, pp. 9–16.
- ▶ Seichter, H. 2004. BenchWorks: Augmented Reality Urban Design. In Proc. 9th Conf. on Computer-Aided Architectural Design Research in Asia, pp. 937–946. Seoul: Yonsei University Press.
- ▶ Shaer, O., Strait, M., Valdes, C., Wang, H., Feng, T., Lintz, M., Ferreirae, M., Grote, C., Tempel, K., and Liu, S. 2012. The Design, Development, and Deployment of a Tabletop Interface for Collaborative Exploration of Genomic Data, International Journal of Human-Computer Studies, 70 (10), pp. 746–764.
- ▶ Soute, I., Kaptein, M., and Markopoulos, P. 2009. Evaluating outdoor play for children: virtual vs. tangible game objects in pervasive games. In Proceedings of the 8th International Conference on Interaction Design and Children (IDC '09). ACM, New York, USA, pp. 250–253.
- ▶ Sultanum, N., Sharlin, E., Costa Sousa, M., Miranda-Filho, D., and Eastick, R. 2010. Touching the depths: introducing tabletop interaction to reservoir engineering. In Proceedings of the ACM International Conference on Interactive Tabletops and Surfaces, pp. 105–108.
- ▶ Thomson, J. A., Ampofo-Boateng, K., Pitcairn, T. K., Grieve, R., Lee, D. N., and Demetre, J. D., 1992. Behavioral group training of children to find safe routes to cross the road. British Journal of Educational Psychology 62, 173–183.
- ▶ Underkoffler, J., and Ishii, H. 1999. URP: a luminous-tangible workbench for urban planning and design. In Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems (CHI '99), ACM Press, pp. 386–393.
- ▶ Wagner, I., Basile, M., Ehrenstrasser, L., Maquil, V., Terrin, J., and Wagner, M. 2009. Supporting community engagement in the city: urban planning in the MR-Tent. Proceedings of the fourth international conference on Communities and technologies. ACM, pp. 185–194.
- ▶ Wagner, I. 2012. Supporting community engagement in the city: urban planning in the MR-Tent. In Proceedings of the fourth international conference on Communities and technologies. ACM, pp. 185–194.
- ▶ Wellner, P. 1991. The DigitalDesk calculator: tangible manipulation on a desktop display. In Proceedings of the 4th annual ACM symposium on User interface software and technology (UIST '91). ACM, New York, NY, USA, 1991, pp. 27–33.

9 BIOGRAPHIE



Sophie LEPREUX

est maître de conférences à l'Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis. Docteur en Informatique (Université de Valenciennes, 2005), Elle mène ses recherches au sein du LAMIH - UMR CNRS 8201 dans le domaine des Interactions Homme-Machine (adaptation au contexte, composition d'IHM, Interfaces distribuées, etc.). Elle a co-encadré des thèses en informatique dans le domaine des interactions tangibles sur table et a participé à des projets ANR sur ce thème. Elle participe à des comités de relectures de conférences nationales, internationales et des revues dans le domaine de l'interaction homme-machine.



Julien CASTET

a intégré le département R&D d'Immersion en 2012. Julien a soutenu une thèse en informatique à l'Institut National Polytechnique de Grenoble en 2010, où il a contribué au design et au développement d'un simulateur physique équipé d'un dispositif d'interaction à retour d'effort proposant des degrés de liberté variables. Il a ensuite réalisé plusieurs séjours post doctoraux à l'université de McGill et à l'université de Bordeaux autour de problématiques proches. Dans une volonté d'appliquer ces compétences à l'industrie, Julien a rejoint l'équipe d'Immersion où il dirige maintenant les activités de recherche en cours dans la société.



Nadine COUTURE

est Professeur en Informatique à l'ESTIA, l'Ecole Supérieure des Technologies Industrielles Avancées. Elle a obtenu le doctorat en 1994 et l'HDR en 2010. Elle enseigne les fondamentaux de l'informatique aux élèves ingénieurs, Algorithmiques, Technologies du Web, Langages de Programmation, Systèmes Mobiles. Ses recherches sont menées à Estia-Recherche, UPR de l'ESTIA, dont elle est responsable, et au LaBRI, UMR CNRS 5800 de l'Université de Bordeaux. Ses recherches, depuis 2001, portent sur l'Interaction Homme-Machine, et plus précisément sur l'Interaction Tangible, de l'incarnation physique des données vers l'interaction avec tout le corps.



Emmanuel DUBOIS

is Professor of Computer Science at the University of Toulouse, leading the Elipse Group (IRIT lab). The Elipse group is specialized in the design, modeling and experimentation of advanced HCI (tangible, mixed and augmented reality, tactile and gestural UI, assistive technologies) in complex interactive context (3D, mass market, disabilities). In this context, E. Dubois is focusing on the design, implementation and evaluation of interaction techniques based on tangible interfaces and interactive surfaces in the field of 3D and multi-dimensional data exploration. He also has a long experience on models and methods for reasoning about, designing and implementing advanced user's interaction techniques. His main application domains are related to knowledge transfer (museum, learning center) and applications for the interactive visualization of large data sets (monitoring, public service management).



Christophe KOLSKI

est Professeur en Informatique à l'Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis. Il a obtenu le doctorat en 1989 et l'HDR en 1995. Il enseigne le Génie Logiciel et l'Interaction Homme-Machine. Ses recherches sont menées au LAMIH-UMR CNRS 8201. Elles portent sur l'Interaction Homme-Machine, le génie logiciel pour les systèmes interactifs, les interfaces intelligentes, ainsi que sur l'interaction tangible et distribuée.



Sébastien KUBICKI

est Maître de Conférences à l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Brest depuis 2012. Il a obtenu son doctorat en Informatique (Université de Valenciennes) en décembre 2011. Actuellement, il mène ses recherches au Lab-STICC UMR 6285 dans l'équipe IHSEV (Interaction Humain Système et Environnement Virtuel) située au CERV (Centre Européen de Réalité Virtuelle). Il est spécialisé dans le domaine de l'Interaction Homme-Machine (IHM), systèmes adaptatifs et nouvelles interfaces utilisateurs tangibles telles que les Tables Interactives avec objets Tangibles (TIT). Actuellement, son axe de recherches porte sur l'étude du potentiel des TIT pour favoriser les apprentissages en classe.



Valérie MAQUIL

est chercheur au Luxembourg Institute of Science and Technology (LIST) à Esch-sur-Alzette, Luxembourg. Docteur en Informatique (TU Vienne, 2010), elle a une expertise de plus de 10 ans sur les interfaces tangibles, les méthodes de conception participatifs, ainsi que les études empiriques. Elle a participé à de nombreux projets de recherche financés par l'union européenne (H2020, INTERREG, ERASMUS+, FP6) portant sur les tables tangibles dans des scénarios collaboratifs de conception, de prise de décision, et de résolution de problèmes.



Guillaume RIVIÈRE

est enseignant-chercheur à l'école d'ingénieurs ESTIA et chercheur au LaBRI, UMR CNRS 5800, depuis 2010. Il a obtenu son doctorat de l'Université de Bordeaux en 2009 sur l'application en Géosciences des Interfaces Tangibles basées sur Tables Interactives. Son centre d'intérêt principal est de démontrer les propriétés des interfaces utilisateurs tangibles avec des prototypes implantant des tâches métiers.

Interaction Tangible sur Table, définitions et modèles

Sophie LEPREUX

LAMIH, UMR UVHC CNRS 8201,
Valenciennes

sophie.lepreux@univ-valenciennes.fr

Julien CASTET

Immersion

julien.castet@immersion.fr

Nadine COUTURE

Estia, LaBRI UMR 5800

n.couture@estia.fr

Emmanuel DUBOIS

Université Toulouse & CNRS,
IRIT, Toulouse

Emmanuel.Dubois@irit.fr

Christophe KOLSKI

LAMIH, UMR UVHC CNRS 8201,
Valenciennes

christophe.kolski@univ-valenciennes.fr

Sebastien KUBICKI

ENI Brest, Lab-STICC UMR 6285,
Brest

sebastien.kubicki@enib.fr

Valerie MAQUIL

LIST Luxembourg

valerie.maquil@list.lu

Guillaume RIVIÈRE

Estia, LaBRI UMR 5800

g.riviere@estia.fr

Tangible interaction on tabletop, definitions and models

Abstract. In recent years, tangible user interfaces, which imply interactions performed with one or several objects, gain more and more interest in research in Human-Computer Interaction (HCI). The tangible object represents a subject or an action. It acts on the system, as an action in classical user interfaces (e.g., GUI). Interaction on a table, which is a common furniture in everyday life and used in multiple activities (desktop, coffee table, kitchen table, etc.), opens a new way for research and development in HCI. In this article, we present definitions, models, and key issues elicited from the literature that enable understanding and reasoning about the couple < interactive tabletop, tangible object > within an interactive system. Then, we propose a framework that allows to characterize applications supported by the couple < interactive tabletop, tangible object > in a domain-independent manner.

Key words: Tangible interaction, interactive tabletop, state of the art, framework

Résumé. Depuis quelques années les interfaces tangibles impliquant des interactions réalisées via un objet (ou plusieurs) prennent de plus en plus d'importance dans les recherches en interaction homme-machine. L'objet tangible représente un sujet ou une action ; l'objet agit sur le système, telle une action sur une interface « classique ». L'interaction sur table, c'est-à-dire sur un meuble présent dans la vie courante et utilisé à diverses fins (bureau, table à manger, table de salon, table bar, etc.), ouvre un champ nouveau de recherche et de développement. La mise en exergue, issue de l'état de l'art, des définitions, modèles et problématiques, permet d'abord d'appréhender le couple (table, objet tangible) au sein d'un système interactif. Puis, nous proposons un cadre qui permet de positionner des applications mettant en œuvre le couple (table, objet tangible). Le cadre est décrit de manière à être utilisé pour positionner des applications indépendamment du domaine.

Mots-clés : Interaction tangible, table interactive, état de l'art, cadre de référence

1 INTRODUCTION

L'objectif de cet article est de dresser à partir d'un état de l'art sur différents travaux associant interfaces tangibles et tables interactives un cadre de référence associant ces deux concepts. L'adjectif « tangible » a deux significations dans le langage courant : « Qu'on connaît par le toucher ; matériel, sensible : la réalité tangible. » et « Que chacun peut constater, qui ne saurait être mis en doute : donner des preuves tangibles ... » (Larousse, 2013). Cette notion a été exploitée en Interaction Homme-Machine, visant à proposer à l'utilisateur « d'autres moyens »¹ pour interagir.

Initialement confinées à des domaines d'application très spécifiques, exigeants et contraints tels que la chirurgie (Lamata et al., 2010), le contrôle aérien (Mackay et al., 1998) ou des applications militaires (McGee & Cohen, 2001), les interfaces utilisateur tangibles sont désormais également présentes dans des applications liées à l'art, au transfert de connaissances, à la communication, au marketing, etc., et ont déjà largement fait les preuves de leurs bénéfices potentiels (Shaer & Hornecker, 2010).

Cet article est le résultat de réflexions menées par des membres du Groupe de Travail (GT) TANGINT/FR de l'AFIHM², centré sur l'interaction tangible. Au cours des échanges liés à l'interaction tangible au sein du GT, nous avons remarqué plusieurs domaines d'utilisation de l'interaction tangible : l'interaction tangible en relation avec la 3D, l'interaction corporelle s'intégrant, selon certaines définitions, dans le domaine de l'interaction tangible et enfin l'interaction tangible en relation avec les tables interactives. Dans cet article, c'est sur ce dernier type d'interaction que nous nous focalisons. Les tables interactives permettent d'interagir seul ou à plusieurs de manière collaborative ou non. Elles peuvent être dotées de différentes technologies et être mises en œuvre dans différents contextes.

Ainsi, afin de dresser un bilan des avancées produites par les membres de ce GT en matière d'interfaces tangibles, cet article propose un cadre fédérateur permettant de positionner des applications et des prototypes concrets. Ce bilan de l'existant et sa structuration visent à recenser et à positionner les facteurs de conception essentiels au développement des surfaces interactives associées à une interaction tangible.

Cet article présente dans la section 2 un ensemble représentatif de définitions et modèles relatifs aux interactions tangibles. La section 3 introduit des tables interactives qui permettent des interactions avec des objets tangibles. Enfin, le cadre de référence est présenté en section 4. Des perspectives de recherche sont proposées en conclusion.

LES APPORTS DE CETTE RECHERCHE :

- ✓ Définitions et modèles relatifs aux interactions tangibles
- ✓ Etat de l'art des tables interactives intégrant des interactions tangibles
- ✓ Cadre de référence permettant de caractériser ce type de surface

2 INTERACTION TANGIBLE

Dans le domaine de l'Interaction Homme-Machine, les termes « Interaction Tangible » et « Interface Tangible » couvrent de nombreuses acceptions. L'objectif est ici d'en rappeler les principales définitions sans prise de parti puis de commenter les modèles les plus représentatifs de la littérature et de rappeler les spécificités interactionnelles de ce paradigme pour une « bonne expérience » utilisateur.

¹ Au sens POST-WIMP, au-delà du WIMP (Windows, Icon, Menu, Pointer) qui désigne le moyen d'interaction par écran, clavier, souris.

² AFIHM, Association Francophone d'Interaction Homme-Machine (<http://afihm.org/>).

2.1 Définitions

Les interfaces tangibles (en anglais, Tangible User Interfaces ou TUI) désignent des interfaces homme-machine telles que l'utilisateur interagit avec un système numérique au moyen d'objets physiques (Fitzmaurice et al., 1995 ; Holmquist et al., 1999 ; Hornecker & Buur, 2006 ; Ishii, 2008a, 2008b ; Ullmer & Ishii, 2000). Ces objets sont équipés de dispositifs appropriés, capteurs et/ou effecteurs, permettant de capter, d'interpréter les événements produits dans le monde physique, de les traduire dans les termes du système numérique et de rendre perceptibles à l'utilisateur, dans le monde physique, les résultats des traitements numériques.

Le terme original « Interface Utilisateur Tangible » (Tangible User Interface) est dû à (Ishii & Ullmer, 1997). Le décalage terminologique entre « Interface Tangible » et « Interaction Tangible » est intentionnel, similaire à celui que l'on trouve entre « conception d'une interface » et « conception de l'interaction ». Le terme « Interaction Tangible » place l'intérêt de la conception sur l'interaction et donc sur l'utilisateur au lieu de la placer sur la partie technique qui est l'interface. Bien que le terme « Interaction Tangible », parce qu'il est plus large et moins strict qu'Interface Tangible, puisse conduire à quelques ambiguïtés décrites dans (Hornecker et al. 2008), la communauté des chercheurs du domaine a décidé d'embrasser clairement la définition étendue³. Il existe donc différentes granularités ou échelles dans l'Interaction Tangible. Pour l'unification de ces granularités, il y a eu trois tendances terminologiques. (Dourish 2001) proposait le terme *tangible computing*. Jacob et al. (2008), décrit dans (Shaer et Horneker 2010), p. 18)) proposaient le concept de *reality-based interaction*. Enfin, (Hornecker et Buur 2006) ont suggéré le terme *tangible interaction*. C'est cette tendance qui a été adoptée. Il est donc admis aujourd'hui que le domaine de recherche de l'Interaction Tangible inclut l'ensemble des travaux sur :

- La tangibilité et la matérialité de l'interface (tangibility and materiality),
- L'incarnation physique des données (physical embodiment),
- L'interaction avec tout le corps (whole-body interaction),
- Le caractère embarqué de l'interface (embedded) et l'interaction de l'utilisateur dans des espaces et des contextes physiques réels.

2.2 Modèles

Dans le domaine des TUI, plusieurs langages et modèles ont été développés pour décrire ces nouvelles formes d'interaction, leur spécificité relevant de la présence du monde physique et de son interconnexion avec le monde numérique. Ces différentes approches de description mettent chacune en avant des concepts, aspects, propriétés ou activités différentes du monde physique. Nous synthétisons ci-après les principales approches de description et traçons un parallèle entre les éléments décrits et des propriétés du monde réel.

Reality-Based Interaction (RBI) (Jacob et al., 2008) est un concept de description d'interfaces post-WIMP. Associé à ce concept, un cadre de référence descriptif est proposé ciblant les 4 thèmes énoncés ci-après. Le thème *Naive Physics* (NP) fait référence à des connaissances simples que l'utilisateur est censé avoir du monde physique ; *Body Awareness and Skills* (BAS) décrit la conscience que l'utilisateur a de son corps et de l'aptitude de celui-ci à le mouvoir et à le contrôler ; *Environment Awareness and Skills* (EAS) désigne les actions réalisées sur l'environnement et les artefacts physiques qui le composent ; *Social Awareness and Skills* (SAS) représente l'ensemble des échanges entre humains. L'interaction tangible, faisant partie des interfaces Post-WIMP, se distingue en

³ C'est dans ce contexte, que la conférence TEI a, en 2010, changé son nom de *Tangible and Embedded Interaction* en *Tangible Embedded and Embodied Interaction* dans le but d'adopter plus explicitement les recherches sur l'interaction gestuelle et l'interaction avec tout le corps.

particulier dans la partie EAS ainsi que dans le thème SAS où les TUI fournissent l'espace et les "périphériques" d'entrée utiles à la collaboration co-localisée. Même si ces thèmes constituent des leviers pouvant être utiles pour mieux imiter le monde réel ou améliorer l'intégration d'un TUI dans le réel, il nous semble que ce cadre propose une granularité trop large pour notre travail.

Dans le modèle *Token And Constraint* (TAC) (Shaer et al., 2004) les objets physiques mis en jeu auxquels sont associées des contraintes physiques sont appelés des *pyfos*⁴. Le couplage pyfo-contraintes constitue un *token* qui peut être associé à un domaine de valeurs ou données numériques possibles. Les TUI sont ici décrites de manière à privilégier l'analyse de l'adéquation entre les artefacts et les contraintes du monde physique impliqués dans la TUI et les contraintes et concepts numériques associés.

Inspiré de TAC et de PAC (*Presentation, Abstraction, and Control*) (Coutaz et al., 1987), le concept de *Tangiget* a été proposé dans le cadre du projet ANR IMAGIT (Caelen & Perrot, 2011 ; Lepreux et al., 2012). Les Tangigets sont des objets tangibles particuliers, qui peuvent être décrits comme des widgets, selon les 3 facettes des agents PAC. La facette *Présentation* définit l'interface de l'utilisateur, c'est-à-dire l'aspect physique de l'objet (forme, matière, etc.) ainsi que le geste d'interaction associé. A l'image de (Shaer et al., 2004) dans le paradigme TAC (Token and Constraints) et afin de prendre en compte les spécificités des interfaces tangibles, deux parties ont été distinguées dans la facette *Présentation* : (1) la matérialisation du Tangiget (c'est-à-dire sa représentation concrète qui peut provenir d'un ou plusieurs objets combinés) et (2) le geste d'interaction (placement, pression, superposition, etc.). La facette *Abstraction* gère les concepts du domaine, en particulier les réactions aux actions de(s) l'utilisateur(s). La facette *Contrôle* gère les relations et les contraintes entre les deux autres facettes ainsi que les relations entre les agents.

Adoptant un point de vue très différent, *Mixed Interaction Model* (MIM) (Coutrix & Nigay, 2006) privilégie les considérations système aux considérations propres au monde physique. En effet, ce modèle décrit et caractérise les modalités d'interaction reliant les mondes physiques et numériques : des paires de dispositifs et langages sont spécifiées pour exprimer de quelle manière les propriétés physiques sont liées aux propriétés numériques impliquées dans la TUI. Ici, la description met en évidence les solutions technologiques et logicielles sous-jacentes au fonctionnement de la TUI : le modèle décrit de quelle manière les liens entre les mondes physiques et numériques sont technologiquement implémentés.

Une approche intermédiaire est illustrée par le modèle "*Adaptor*", "*System*", "*User*", "*Real entities*" (ASUR) (Dubois & Gray, 2007). Ce modèle s'intéresse particulièrement à la description de l'interaction entre l'utilisateur, les artefacts physiques et le système informatique. Ce modèle s'appuie sur l'identification d'entités physiques (R), d'entités numériques constituant le système informatique (S) et d'adaptateurs (A) faisant le lien entre les deux mondes. A ceci s'ajoute l'identification des canaux d'interaction qui décrivent quelles entités échangent de l'information et comment elles collaborent afin que l'utilisateur (U) tire profit du système tangible, plus généralement appelé système interactif mixte dans ce modèle. Le focus principal du modèle ASUR est la manière selon laquelle l'utilisateur doit se comporter pour interagir avec la TUI et comment son comportement affecte celui de la TUI : l'adéquation du comportement de l'utilisateur avec le contexte interactif cible peut ainsi être étudié et ajusté. Ce modèle sert d'ailleurs de point d'entrée dans un processus de conception complet couvrant la conception de l'interaction, la conception de l'architecture logicielle, l'implémentation du système (Dubois et al., 2014) et jusqu'à une contribution à l'évaluation du système final (Dubois et al., 2013).

Enfin, Hornecker & Buur (2006) proposent un cadre autour de quatre thèmes : (1) la *manipulation tangible* (en anglais « Tangible Manipulation ») fait référence aux

⁴ Le nom pyfo est inspiré de l'espagnol afin de différencier le mot objet usuel des objets physiques tangibles.

représentations matérielles avec des qualités tactiles distinctes – qui sont typiquement manipulées physiquement dans le cas d'une interaction tangible, (2) *l'interaction spatiale* (en anglais « Spatial Interaction ») montre le fait que l'interaction tangible est intégrée dans un espace réel, l'interaction se réalisant par des mouvements dans l'espace, (3) *la facilitation incarnée* (en anglais « Embodied Facilitation ») montre comment la configuration des objets matériels et de l'espace affecte et dirige l'émergence d'un comportement de groupe et (4) *la représentation expressive* (en anglais « Expressive Representation ») cible les représentations matérielles et numériques employées par les systèmes d'interaction tangible.

On constate finalement que chaque modèle propose un point de vue différent (point de vue utilisateur vs. technologique), une granularité spécifique (à gros grain impliquant des systèmes interactifs plus larges tels que les systèmes mixtes et qui perdent la spécificité des TUI vs. à grain fin, qui sont certes plus centrés sur l'interaction tangible mais ne permettent pas d'intégrer d'autres aspects – collaboratifs par exemple). Un cadre permettant de positionner à la fois les aspects du monde et son utilisateur et les aspects techniques permettant de préciser les TUI permettrait de fournir un compromis complémentaire à ces cadres. Des applications existantes sont positionnées et permettent d'illustrer et de valider ce cadre dans l'article conjoint (Lepreux et al., 2016).

2.3 Spécificités contribuant à une bonne expérience utilisateur avec les TUI

Par rapport aux IHM traditionnelles de type clavier et souris, les TUI incluent une couche intermédiaire supplémentaire qui se compose d'objets physiques utiles à l'interaction et présents dans l'environnement physique de l'utilisateur. Cette couche intermédiaire contribue fortement à l'accroissement du nombre de solutions d'interaction possible du fait de l'interconnexion entre les mondes physiques et numériques.

Les métaphores d'interaction mettent en correspondance des éléments d'interface avec des commandes et actions du domaine numérique. Ce procédé est largement connu en IHM car il permet de donner du sens aux interfaces en suggérant à l'utilisateur une interprétation de l'interface compatible avec son rôle prévu dans le système interactif (Andersen, 1992). Il a d'ailleurs été largement étudié dans différents domaines d'application afin notamment de mieux comprendre comment concevoir une « bonne » métaphore (Vaananen & Schmidt, 1994). Dans les travaux suivants, les métaphores sont intégrées aux propriétés des TUI décrites au sein de continuum ou de taxonomies.

En ce sens Underkoffler & Ishii (1999) ont proposé une première taxonomie indiquant les rôles possibles qu'un artefact physique peut jouer dans une TUI. Ainsi, un objet physique de la couche intermédiaire évoquée ci-dessus peut être utile à une TUI en tant que médiateur, c'est-à-dire un objet porteur d'information, ou en tant qu'acteur, c'est-à-dire un objet spécifique jouant un rôle dans le système, parce que l'un de ses attributs a un sens pour l'application, ou encore en tant qu'outil polyvalent.

Au-delà de ces rôles joués par un artefact physique dans une TUI, Koleva et al. (2003) ont défini la notion de « degré de cohérence ». Cette notion est utilisée pour exprimer à quel point les objets physiques et numériques impliqués sont perçus comme étant les mêmes. Par exemple, il peut s'agir d'une illusion parfaite et complète de la fusion de l'objet physique et de sa représentation ; une version dégradée peut ne concerner que certaines parties de l'objet ou certains attributs tels que l'orientation et la position par exemple ; à un niveau encore moindre, l'objet physique peut apparaître comme étant juste un proxy pour une manipulation ou une donnée, voire juste un outil très générique. Dans le même esprit, la propriété de continuité a été introduite et déclinée au niveau de la perception et de la compréhension des données portée par la TUI (Dubois et al., 2001).

Enfin, Fishkin (2004) a proposé de considérer la "tangibilité" comme un attribut à valeurs multiples sous forme d'un continuum analytique à deux dimensions. L'axe métaphorique classe les interfaces tangibles selon que l'effet d'une action de l'utilisateur sur le système est

analogue à l'effet produit par une action similaire du monde réel ; l'axe incarnation classe les interfaces tangibles en fonction du degré selon lequel l'entrée est distincte de la sortie. Les métaphores de « noms » et de « verbes » sont les deux types de métaphores soulignées par cette taxonomie. Cette distinction est conforme à celle décrite par Oppl & Stary (2011) qui, pour distinguer différentes formes de TUI, opposent deux préoccupations : apparence et comportement tout en introduisant la notion de métaphore.

Ces premières approches de caractérisation de la « qualité » des TUI sont donc principalement basées sur l'identification d'une correspondance isomorphe entre objets physiques et numériques d'une part, et action et effets d'autre part. Pour aller plus loin et mieux exploiter la signification qu'un objet physique peut véhiculer, plusieurs adaptations de la *Conceptual Metaphor Theory* (CMT) proposée par Lakoff & Johnson (1980) ont été développées. A l'origine CMT fait référence à la compréhension d'une idée en utilisant les termes d'une autre idée : CMT vise donc l'étude des correspondances établies entre concepts et a introduit les termes de source, de cible et de mise en correspondance propres aux métaphores. Sur la base de ces principes, Antle et al. (2009), Hurtienne & Israel (2007), Macaranas et al. (2012) et très récemment Celentano & Dubois (2015) ont étendu CMT aux concepts des TUI : les éléments mis en correspondance et constituant les sources et cibles incluent désormais des concepts physiques, leurs attributs et leurs propriétés spatiales. Les possibilités offertes pour créer une TUI sont multiples : le domaine des possibles en TUI est donc extrêmement riche et varié et l'ensemble des attributs et concepts manipulables et combinables est très vaste. Identifier l'ensemble des sources, cibles et mises en correspondances possibles dans une métaphore tangible reste donc difficile.

Une première réponse à cette diversité des solutions a été proposée par Maquil et al. (2011). Ces travaux structurent une TUI en trois domaines : le domaine physique, le domaine numérique, et le domaine de l'application. Les deux premiers domaines sont décomposés en deux parties : les objets et les manipulations, ce qui fait écho à la distinction commune établie et reconnue dans le domaine des TUI entre apparence et comportement. Les sources et cibles des métaphores peuvent donc être issues de l'un de ces quatre sous-domaines. Cet affinement de la caractérisation d'une métaphore tangible permet alors de soulever des questions spécifiques en termes d'implémentation et de conception (Maquil et al., 2012). Par exemple : Quels sont les messages que les utilisateurs veulent communiquer ? Quels aspects numériques et physiques expliquent au mieux ces messages ? Quelles manipulations physiques permettent de créer des représentations avec ces aspects digitaux et physiques ? Quelles caractéristiques du physique expliquent au mieux l'ensemble des manipulations physiques ?

Hornecker (2012) dépasse l'identification de ces domaines et souligne que les objets physiques ont potentiellement un ensemble illimité de propriétés aptes à être impliquées dans une relation métaphorique. Hornecker insiste spécifiquement sur le fait que certaines propriétés physiques peuvent elles-mêmes influencer sur la perception, la compréhension et le comportement de l'utilisateur : la mise en correspondance entre un objet et son utilisation peut donc être entièrement due à l'affordance (Norman, 1999) suscitée par l'objet lui-même.

Il en résulte que concevoir une TUI en bonne adéquation avec l'utilisateur et son environnement met en jeu plusieurs dimensions encore mal cernées et que la notion de métaphore semble porteuse pour comprendre et décrire les interactions dans la mesure où l'essence même d'une TUI est de faire coexister mondes physiques et numériques, l'un étant d'une manière ou d'une autre la représentation de l'autre.

3 TABLES ET INTERACTION TANGIBLE : UNE RICHESSE DE COMPORTEMENT

Depuis 25 ans maintenant, les TUI sont de plus en plus répandues (Blackwell et al., 2007 ; Müller-Tomfelde, 2010) dans les IHM, y compris associées aux tables interactives (Couture & Rivière, 2007), même si les interfaces tangibles peuvent y prendre des formes très différentes (Ishii, 2008a). Les tables interactives permettent de nouveaux types d'interactions, voire de nouvelles manières de travailler en relation avec les objets physiques. Déjà en 1991, Wellner (Wellner, 1991) exploite avec le *Digital Desk* les spécificités d'une surface d'interaction et d'objets tangibles associés à un système de capture. Weiss et al. (2009a, 2009b) proposent dans leurs travaux un système de widgets tangibles, nommé SLAP (*Silicone iLluminated Active Peripherals*), utilisable sur une table interactive. Patten et al. (2001) proposent la *SenseTable*, une plateforme de suivi d'objets sans fil pour des interfaces utilisateur tangibles. La table inFORM du Media Lab (Follmer et al., 2013) permet d'avoir un feedback tangible en relief sur la table. Patten et al. (2002) proposent l'*Audiopad* adaptée à la composition musicale tandis que Ståhl et al. (2002) proposent la table interactive *Pond* qui pour de l'exploration informationnelle. Grâce à *ReactIVision* proposée par Kaltenbrunner & Bencina (2007), il devient facile de détecter des objets tangibles (ou du moins une face de l'objet) placés sur une table et ce grâce à un symbole collé sous l'objet et détecté par une caméra infrarouge. Cette technologie sera le support de la *ReactTable* (Kaltenbrunner et al., 2006 ; Jordà et al., 2007), une table interactive permettant la création musicale. Sur le thème de la musicographie, Maximo et al. (2009) proposent la *Collectable*, une plate-forme interactive pour gérer des albums musicaux. La technologie RFID est également utilisée pour détecter la présence d'objets physiques. Des tags RFID (*Radio Frequency IDentification*) sont associé(s) à chaque objet participant à l'interaction. Ces tags (Finkenzeller, 2003) permettent de garantir l'unicité de l'objet et sa localisation. Par exemple, Olwal & Wilson (2008) proposent *SurfaceFusion* qui s'appuie sur le suivi d'objets tangibles munis de tag RFID sur table. Dans la même logique, Hosokawa et al. (2008) proposent un système support à la conception qui utilise des objets tangibles (RFID) ; leur exemple suggère la conception d'une nouvelle maison à l'aide d'objets murs, portes, etc., équipés d'étiquettes RFID. Kubicki et al. (2013), ainsi que Lebrun et al. (2013), ont exploité la technologie RFID pour l'utilisation d'objets tangibles sur table interactive couplés à des Systèmes Multi-Agents pour des applications telles que la simulation interactive de trafic routier.

Les recherches actuelles se penchent également sur le caractère autonome des objets tangibles. Les objets pouvant devenir indépendants (ex. petits robots) et donc se déplacer automatiquement de manière autonome sur la table (*actuation*). Bien évidemment, cette particularité est directement liée aux capacités des objets utilisés sur la table (Pangaro et al., 2002 ; Weiss et al., 2010 ; Le Goc et al., 2015).

Au-delà des aspects technologiques que nous venons de voir (RFID, actuation, etc.) qui offrent différentes manières de manipuler des objets ayant pour support une table, nous pouvons également considérer les manipulations sous l'angle de la tâche à accomplir. C'est selon ce point de vue, que dans cette section nous regroupons, selon trois types de manipulations, des travaux de la littérature : les manipulations spatiales, l'assemblage et le modelage. Nous utilisons ces trois types de manipulation dans cette section afin de structurer notre discours qui vise à montrer toute la diversité des manipulations possibles au sein de systèmes interactifs tangibles sur tables.

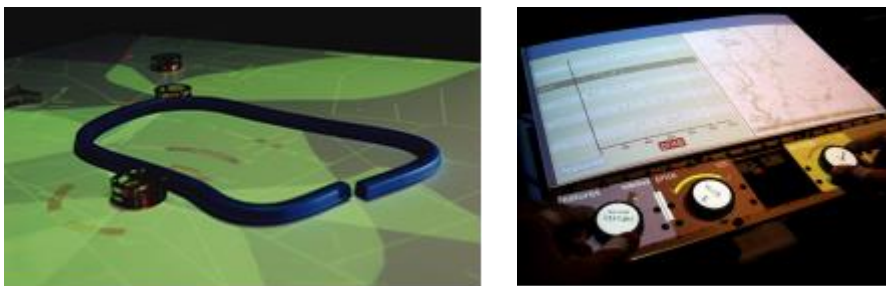
3.1 Manipulations spatiales

Les types de manipulations les plus courantes sur tables interactives sont les manipulations spatiales. Cubes, blocs, briques et autres objets peuvent être placés, translattés et tournés. Les manipulations sont détectées par capture vidéo, radio fréquence ou à l'aide de capteurs.

Les manipulations spatiales d'objets physiques peuvent être trouvées dans une large variété de domaines d'application comme l'apprentissage, la résolution de problème, la visualisation et le divertissement. A travers la configuration spatiale des objets physiques, les utilisateurs peuvent établir des liens, des ordres, ou des groupements et manipuler différents paramètres. Par exemple, *PICO* (Patten & Ishii, 2007) est basé sur une table interactive avec des manipulations spatiales d'objets physiques combinés à des contraintes mécaniques afin d'optimiser le placement pour un réseau urbain d'antennes de téléphones cellulaires (cf. Figure 1, gauche).

Les interfaces de requêtes tangibles (Ullmer & Ishii, 2003) utilisent des jetons physiquement contraints tels que les barres et molettes pour la manipulation de paramètres dans des requêtes de bases de données. Les jetons sont associés, tournés et translattés afin de modifier les valeurs individuelles (cf. Figure 1, droite).

Figure 1 : Manipulations spatiales pour définir le placement optimal d'antennes de téléphones cellulaires ou de valeurs de paramètres spécifiques (Photos provenant de (Patten & Ishii, 2007) et (Ullmer & Ishii, 2003))



L'essentiel des manipulations spatiales sur tables interactives consiste à tourner et à translater des objets sur une surface 2D. Il existe toutefois quelques exemples montrant des implémentations alternatives de manipulations physiques, en utilisant des capteurs de pression, des accéléromètres, des capteurs de mouvement, des capteurs de luminosité, des moteurs, et des communications sans fil. Les utilisateurs peuvent appuyer, pousser, toucher, serrer ou secouer les objets utilisés dans l'interaction. *Swamped!* du MIT Media Laboratory, (Johnson, et al., 1999) offre une expérience de dessins animés interactifs dans lesquels des jouets en peluche instrumentés sont utilisés comme des interfaces tangibles pour diriger des personnages animés autonomes. L'utilisateur prend le rôle du personnage et le contrôle en faisant des gestes appropriés avec le jouet, tels que bailler, marcher ou battre des ailes.

3.2 Assemblage sur table

Certains TUI s'appuient sur des manipulations inspirées des jeux de constructions comme les LEGO®. Ils fournissent un ensemble de composants qui peuvent être physiquement connectés selon différents angles de manière à créer des structures physiques. Ces TUI constituent les assemblages constructifs, un des trois grands types d'interfaces tangibles proposées par (Ullmer et al., 2005). La grande majorité de ces TUI utilise une table pour supporter ces assemblages. C'est à cette catégorie que nous nous restreignons ici. Les *ActiveCubes* de (Kitamura et al., 2001), qui permettent l'assemblage de cubes dans un espace 3D, illustrent bien cette approche.

Les assemblages TUI font appel à des techniques d'interaction bi-manuelle fondée sur le cadre conceptuel de (Guiard, 1987). Une interaction efficace de la part de l'utilisateur pour orienter et mettre en position des pièces 3D est essentielle. Ces interfaces, purement manuelles, peuvent d'ailleurs être complétées par des techniques de mise en correspondance automatique comme par exemple dans (Mellado et al., 2010). Un domaine d'application tout à fait approprié est l'archéologie (Reuter et al., 2007). En effet, les fragments archéologiques trouvés sont souvent brisés en un grand nombre de fragments. Les archéologues sont alors confrontés à la reconstruction de « puzzles 3D » d'une grande

difficulté. Numériser les fragments puis les assembler virtuellement est une solution élégante. C'est même parfois la seule solution.

Dans ce contexte d'interaction bi-manuelle, d'autres systèmes ont été réalisés et étudiés, y compris avec des interfaces non-tangibles comme l'étude sur les entrées à deux mains de (Buxton & Myers, 1986). Une part du succès de ces interfaces bi-manuelles a été attribuée au bénéfice obtenu sur le plan de la charge cognitive (Leganchuk et al., 1998). Le travail fondateur de ces approches est décrit dans (Hinckley et al., 1994) où des objets réels sont utilisés en tant qu'interface pour la visualisation en neurochirurgie. Ce n'est pas à proprement parler un assemblage car il n'y a pas deux objets qui deviennent solidaires pour en former un nouveau, mais, ces travaux sont les premiers à étudier la mise en position relative d'objets tangibles. En ce sens, ils ont fourni les fondements aux travaux sur l'assemblage. Dans tous ces travaux, la technique d'interaction proposée pour l'assemblage de ces pièces virtuelles consiste à fournir à l'utilisateur au minimum deux interacteurs. Ces interacteurs sont tenus dans chaque main. Tous les mouvements (translations et rotations) que l'utilisateur effectue sur les interacteurs sont immédiatement reproduits à l'écran sur les deux objets numériques qui leur sont associés. Les positions et orientations 3D des objets physiques sont directement associées aux objets virtuels correspondants affichés sur l'écran. Par exemple, le système ESKUA (Expérimentation d'un Système Kinésique Utilisable pour l'Assemblage), dans (Garreau et al. 2005), complète la souris et le clavier pour certaines activités du concepteur dans son usage des logiciels de Conception et Fabrication Assistée par Ordinateurs (CFAO). Il a été démontré que l'utilisation de ces interacteurs pour manipuler les objets dans l'espace est réellement pertinente et performante (Reuter et al., 2010).

Des objets tangibles assemblables ont également, et avec succès, été utilisés dans le domaine de la programmation. Par exemple, *Topobo* (Raffle et al., 2004) combine des composants passifs (statiques) et actifs (motorisés) pour construire des créatures robotiques (cf. Figure 2). Le mouvement des articulations spéciales peut être programmé par démonstration par l'enregistrement et le re-jeu des déplacements physiques. Des tâches de programmation plus abstraites peuvent être réalisées avec des *SystemBlocks* et des *FlowBlocks*, deux systèmes interactifs modulaires et physiques destinés à des enfants pour modéliser et simuler des comportements dynamiques (Zuckerman & Arida, 2005). Les utilisateurs connectent des blocs représentant des stocks, des flux, des variables et des sondages de manière à explorer des concepts tels que les taux, l'accumulation, les processus simultanés, les retours d'information positifs et négatifs.

Dans *PuzzleTale*, (Shen & Mazalek, 2010) ont exploité l'assemblage d'objets tangibles sur table pour la création interactive de narration (se reporter à la Figure 3).

Figure 2. Le système *Topobo* (à gauche) et une création d'animal (à droite) (Photos provenant de (Raffle et al., 2004))

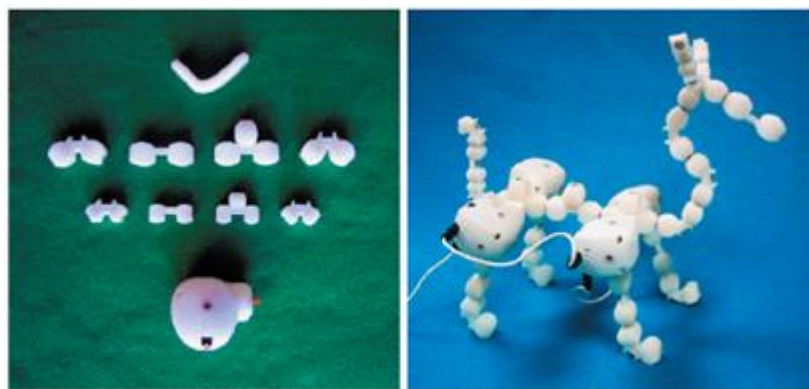
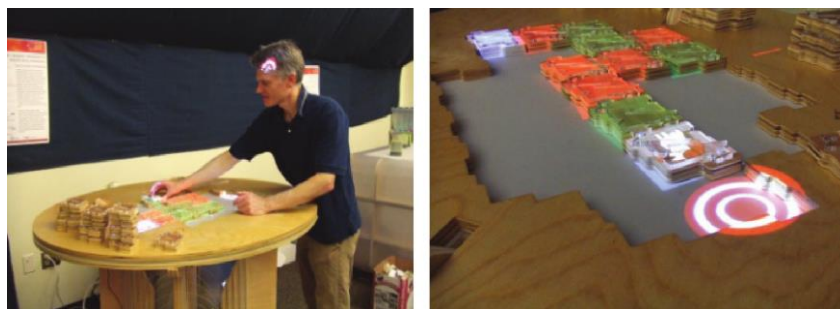


Figure 3. Le système PuzzleTale est utilisé par un sujet (à gauche). Celui-ci doit guider l'acteur principal (celui intégré dans la narration liée au jeu) afin qu'il arrive à destination, extrait de (Shen & Mazalek, 2010)



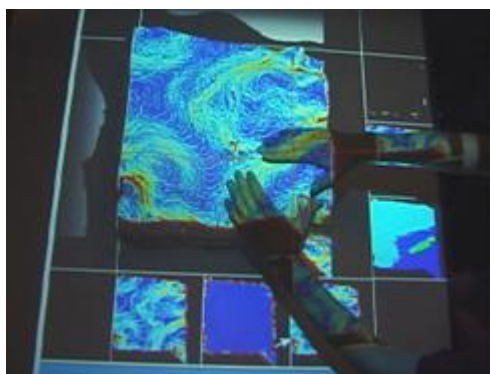
Les systèmes présentés dans cette section nécessitent un support de type horizontal large, de type table, pour faciliter l'assemblage. Ils ont été présentés ici, car même si dans leur version actuelle ils n'impliquent pas tous explicitement de table interactive, il nous paraît clair que celles-ci présentent un potentiel énorme pour étendre leurs capacités, par exemple par reconnaissance automatique d'erreurs d'assemblage et de nécessités d'aide.

3.3 Modelage sur table

Quelques TUI fournissent un matériau flexible et malléable qui permet des interactions basées sur l'appui, la traction, le pincement et autres actions de déformation. Ces types de manipulations d'objets permettent de former continûment des données d'entrée dans plusieurs dimensions et offrent un nouveau type d'expérience haptique.

Illuminating Clay (Piper & Ratti, 2002), illustre cette approche. Basé sur la modélisation de sable ou d'argile, ce système permet à des utilisateurs d'analyser et d'altérer la topographie d'un modèle paysager argileux (cf. Figure 4). A travers un modèle d'argile physique, les utilisateurs peuvent rapidement créer des structures hautement complexes et des topographies qui seraient très coûteuses en temps si elles étaient produites avec des outils de CAO. Un scanner laser installé au plafond capture en temps réel le changement de géométrie de l'argile. Les résultats sont vidéo-projetés sur l'espace de travail sous forme de gradients de couleur.

Figure 4. Variation de l'inclinaison d'un modèle argileux pour étudier la conception des paysages (photo de (Piper & Ratti, 2002))



Un autre exemple est *PhotoelasticTouch* (Sato et al., 2009) qui utilise une sorte de matériau élastique transparent capable de détecter la pression. Le système calcule l'orientation et la puissance de la force qui lui est appliquée en capturant les modifications dans la polarisation de la lumière. Dans l'article, trois applications pratiques de *PhotoelasticTouch* sont présentées : un panneau tactile sensible à la force, une application de visage tangible et une application de dessin. Plus récemment, une interface tangible pour le contrôle d'une simulation physiquement réaliste de déformations a été proposée par (Takouachet et al., 2012).

Ces quelques applications, citées parmi un vaste état de l'art, montrent la grande diversité des interfaces tangibles sur table. Il est aujourd'hui relativement difficile de les comparer et d'évaluer leurs forces et limitations. Avec l'objectif de faire un pas vers un moyen d'analyse systématique, nous proposons dans la section suivante, un cadre de référence.

4 CADRE DE REFERENCE

Nous utilisons le cadre de (Dubois, 2009) comme support analytique aux systèmes à interaction tangible. Ce cadre propose des axes de variabilité pour les Systèmes Interactifs Mixtes (SIM). Un SIM, selon (Dubois, 2009), est un système interactif qui tire profit des capacités de stockage, de rendu et de transformation de données numériques par un système informatique et qui facilite l'intégration et l'exploitation des aptitudes physiques et habitudes de l'utilisateur, ainsi que des ressources physiques présentes dans son environnement d'interaction. Ces systèmes englobent donc les systèmes relevant de la réalité augmentée, de la virtualité augmentée, de la réalité mixte, des interfaces tangibles et des systèmes enfouis. Ce cadre n'est donc pas spécifique aux systèmes à interface tangible mais est adéquat comme cadre de référence.

Dans un premier temps, les sources de variabilité utilisées dans le cadre sont décrites, ensuite le cadre sera présenté globalement.

4.1 Sources de variabilités

Cinq sources principales de variation entre les nombreuses formes de Systèmes Interactifs Mixtes présentés dans la littérature ont été identifiées, voir la Figure 5. Les deux premières sources contribuent à cerner le contour de la situation d'interaction mixte. Il s'agit de la place du monde physique dans un SIM et des différentes formes de communication en entrée / sortie utilisées. Deux autres sources de variabilité ont trait à la situation d'usage induite par le SIM. Il s'agit de la cohérence entre les espaces d'interaction d'une part et de la cohérence entre les mondes physiques et numériques d'autre part. Enfin, les technologies utilisées constituent la cinquième et dernière source de variabilité des SIM.

4.1.1 Place du monde physique en entrée et en sortie

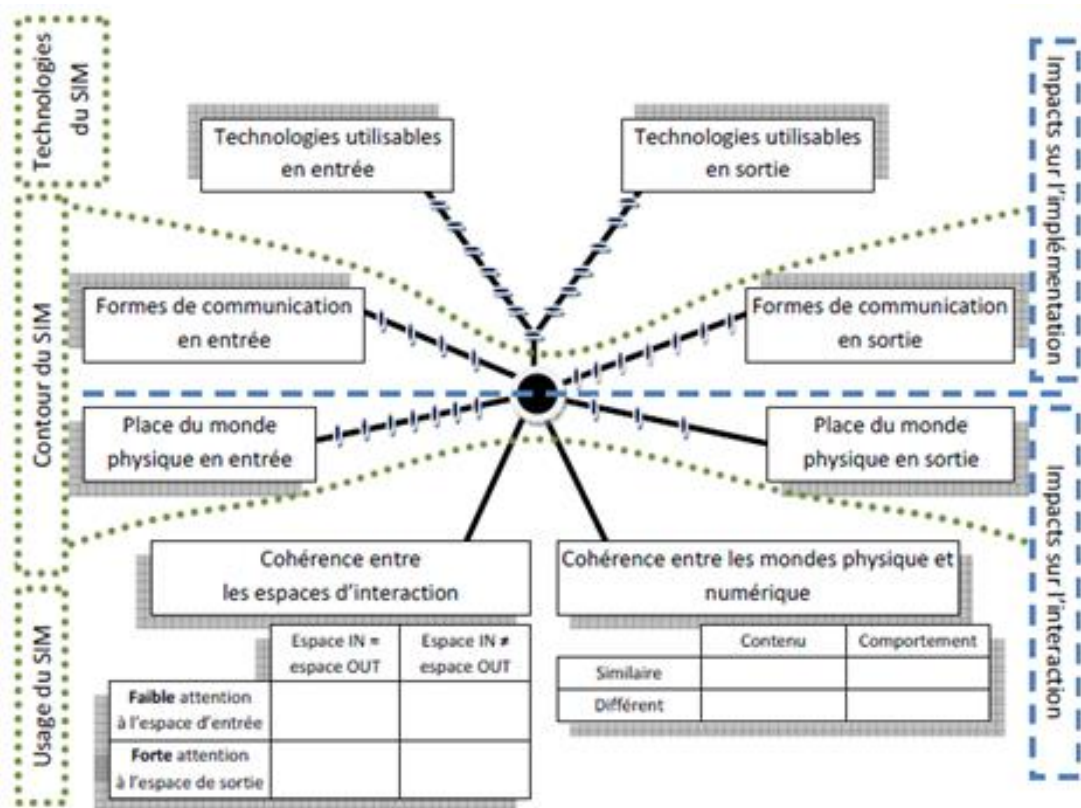
Le monde physique peut occuper différentes places dans un SIM et ainsi contribuer de différentes manières à la communication avec le système informatique. En effet, un SIM peut s'appuyer sur le monde physique en entrée et peut avoir un impact sur le monde physique en sortie. En entrée, sept aspects physiques (position, présence, mouvement, orientation, forme, reconnaissance, combinaison) constituent un ensemble courant mais non exhaustif des places que peut occuper le monde physique dans un SIM pour contribuer à la transmission d'information au système informatique. Des aspects complémentaires tels que la rugosité ou la densité des objets pourraient, par exemple, être également pris en compte. En sortie, trois différents aspects physiques (rendu d'information dans le monde physique, déplacement d'un objet physique, aucun effet physique mais déclenchement d'une action numérique) constituent un ensemble non exhaustif de places que peut occuper le physique dans le rôle rempli par un SIM en termes de production d'information en sortie.

4.1.2 Formes de communication en entrée / sortie

Une forme de communication d'entrée / sortie d'un SIM décrit les moyens employés pour diffuser et encoder les composantes du monde physique échangées au cœur d'un SIM pour permettre au monde physique de prendre les différentes places évoquées dans la section précédente. D'une part, il existe plusieurs formes possibles pour un même aspect physique : par exemple reconnaître un objet peut s'appuyer sur un encodage exploitant la variation d'une onde radio ou sur l'analyse du contenu d'une image. D'autre part, chacune de ces formes d'entrée / sortie peut donner lieu à une implémentation basée sur différentes

solutions techniques. Par exemple, l'analyse visuelle d'une scène peut reposer sur une caméra infrarouge ou sur une caméra classique.

Figure 5. Diagramme de Kiviati des sources de variabilité (Dubois, 2009)



4.1.3 Cohérence entre les espaces d'interaction d'entrée et de sortie

Dans un SIM, des entités physiques et numériques coexistent. Pour accompagner l'utilisateur dans la réalisation de sa tâche, et l'aider à atteindre ses objectifs, ces entités physiques et numériques doivent être reliées pour déclencher les traitements appropriés. Par exemple, dans Digital Desk (Wellner, 1991), les ressources nécessaires pour l'interaction en entrée sont manipulées au niveau de la zone de rendu des informations produites par le système. Les espaces d'interactions en entrée et en sortie forment différentes configurations de l'environnement d'interaction. Ces différentes configurations induisent des variations dans la cohérence entre les espaces d'interaction qui peuvent être organisées selon deux dimensions : d'une part l'attention (faible ou forte) qu'il est nécessaire de porter aux dispositifs d'interaction en entrée pour transmettre une information et, d'autre part, la continuité entre les espaces d'interaction en entrée et en sortie qui peut exister ou non. Quatre situations de cohérence entre les espaces d'interaction émergent alors (cf. Figure 5).

4.1.4 Cohérence entre les mondes physique et numérique

En IHM, il est habituel de distinguer deux aspects de l'interaction : la perception et l'action. Ces deux aspects reposent respectivement sur le contenu et le comportement des échanges entre l'utilisateur et le système. Analyser la cohérence entre les mondes physique et numérique mis en présence dans un SIM peut donc en partie s'appuyer sur l'analyse du contenu et du comportement des liens existants entre les ressources physiques et numériques. Ces liens, dans un SIM, constituent la base des échanges entre l'utilisateur et le

système informatique. À partir d'une comparaison binaire (similaire ou différent), quatre situations distinctes sont identifiées (cf. Figure 5).

4.1.5 Technologies utilisées

En entrée, le dispositif le plus fréquemment utilisé a pour but la localisation d'éléments physiques. Des capteurs divers (lumière, pression, etc.) peuvent aussi être utilisés. Du point de vue des espaces de sortie, il s'agit essentiellement de rendre visible de l'information (écrans, vidéoprojecteurs, casques monoculaires, semi-transparents, immersifs ou à affichage déporté, lentille jouant le rôle d'un écran semi-transparent, ...). Enfin, à la frontière entre ces deux espaces d'interaction se situent les dispositifs à retours d'efforts.

4.2 Cadre de variabilité des SIM

Ces cinq dimensions peuvent être utilisées pour prendre conscience des spécificités présentes au cœur d'un SIM, et ainsi mettre en évidence l'hétérogénéité potentielle des SIM que nous sommes amenés à concevoir et implémenter. Le diagramme de la Figure 5 reprend ces différents axes.

Les axes de variabilité utilisés pour cartographier et caractériser les SIM, traduisent trois préoccupations différentes, représentées sur la gauche de la Figure 5. Les quatre premiers axes (place du physique et forme de communication en entrée et en sortie) définissent le contour de l'interaction dans une situation d'interaction mixte. Deux axes complémentaires (cohérence des espaces d'interaction et des mondes physique et numérique) ont trait à la situation d'usage induite par le SIM. Enfin les deux derniers axes identifiés (technologies en entrée et en sortie) représentent les préoccupations premières du domaine des SIM, l'appropriation de technologies émergentes.

5 CONCLUSION

Cet article a tout d'abord introduit les interfaces tangibles, faisant l'objet d'un vaste courant de recherche, aussi bien au niveau international que national. Dans un premier temps, les fondements et les motivations des travaux dans le domaine de l'interaction homme-machine ont été posées. Dans un second temps, les tables interactives interagissant avec des objets tangibles ont été introduites. Les principaux types de manipulations d'objets tangibles ont été présentés (visées de manipulations spatiales, ou encore d'assemblage ou modelage sur table), débouchant sur une grande richesse pour ce qui est des propositions disponibles dans la littérature.

Au vu de cette richesse, un cadre de référence a été exploité dans l'article, celui proposé par (Dubois, 2009). Il a été choisi dans la mesure où il fournit des axes de variabilité pour des Systèmes Interactifs Mixtes (SIM). Rappelons que, selon cet auteur, un SIM tire profit des capacités de stockage, rendu et transformation de données numériques par un système informatique et facilite l'intégration et l'exploitation des aptitudes physiques et habitudes de l'utilisateur, ainsi que des ressources physiques présentes dans son environnement d'interaction. Les applications visées dans cet article, fonctionnant sur table interactive avec objets tangibles, peuvent être considérées comme des systèmes mixtes, exploitant explicitement éléments numériques et tangibles.

Dans l'ensemble des travaux présentés, les enjeux et avancées en termes de recherche ont été précisés, tout en laissant entrevoir des perspectives. Il ressort en premier lieu de cet état de l'art que les tables tangibles répondent à de nombreux cas d'usages et d'activités déjà pratiquées spontanément sur une table. En allant plus loin, la configuration même des surfaces interactives doit être étudiée en fonction de l'activité pratiquée. Étudier la forme physique de la table fait notamment partie des recommandations de (Wallace & Scott 2008). L'intégration de l'informatique dans la vie de tous les jours, que ce soit dans le domaine privé ou public, pour des applications personnelles ou professionnelles, induit de nouvelles

contraintes de configuration (accessibilité, visibilité) ou crée de nouvelles situations de travail inexistantes jusqu'ici. Par exemple, dans (Rivière & Couture 2008) la forme de la table tangible a été étudiée pour la construction d'une simulation 3D dans le contexte d'une vente en boutique ou dans un salon d'exposition où les participants ont des rôles différents : le vendeur et les clients, accompagnés de leurs enfants ou de leurs amis. La table n'engendre alors pas de face à face (comme les tables rectangulaires), ni de situations de promiscuité (comme les tables rondes). C'est une table à trois branches, qui évoque une forme en étoile.

Nous envisageons en perspectives connexes à ce travail de positionner un certain nombre de travaux de recherche, issus de la communauté francophone en Interaction Homme-Machine et illustratifs du domaine, exploitant des interactions tangibles sur table interactive, par rapport au cadre de référence, afin de montrer son pouvoir descriptif selon chacun de ses axes.

LES PERSPECTIVES D'APPLICATION DE CETTE RECHERCHE :

- ✓ Conception d'application à interaction tangible
- ✓ Catégorisation d'application à interaction tangible

6 REMERCIEMENTS

Cet article a été rédigé dans le cadre du Groupe de Travail TANGINT/FR soutenu par l'AFIHM. Certains de ces travaux sont par ailleurs financés par différents organismes : le ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche, la région Nord/Pas-de-Calais, la région Aquitaine, l'ACBA, le CNRS, l'Europe (FEDER, FP6 et FP7), le CISIT et l'ANR. Les auteurs remercient les relecteurs anonymes pour leurs nombreuses remarques pertinentes, de même que les éditeurs en chef de la revue JIPS pour leur soutien.

7 REFERENCES

- ▶ Andersen, P. 1992. Computer semiotics. *Scandinavian Journal of Information systems*, 4, 3–30.
- ▶ Antle, A. N., Corness, G., Bakker, S., Droumeva, M., Van Den Hoven, E., And Bevans, A. 2009. Designing to support reasoned imagination through embodied metaphor. In *Proceeding of the seventh ACM Conference on Creativity and Cognition (C&C '09)*, ACM, New York, NY, USA, pp. 275–284.
- ▶ Blackwell, Alan F., Fitzmaurice, G., Holmquist, L. E., Ishii, H., and Ullmer, B. 2007. Tangible user interfaces in context and theory. In *Extended Abstracts of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems (CHI EA'07)*, New York, NY, USA, ACM, pp. 2817–2820.
- ▶ Buxton, W., and Myers, B. 1986. A study in two-handed input. *SIGCHI Bull.* 17, 4 (April 1986), 321-326.
- ▶ Celentano, A., and Dubois, E. 2015. Evaluating Metaphor Reification in Tangible Interfaces. *Journal on Multimodal User Interfaces*, pp. 1–22, Springer.
- ▶ Caelen, J., And Perrot, C. 2011. Bibliothèques d'objets. Rapport de projet ANR IMAGIT (rapport 1), LIG, Grenoble, mai.
- ▶ Coutaz, J. 1987. PAC, an implementation model for dialog design. In H.J. Bullinger, B. Shackel, eds., *Proceedings Interact'87 Conference*, North Holland, pp. 431–436.
- ▶ Coutrix, C., And Nigay, L. 2006. Mixed reality: a model of mixed interaction. In *Proceedings of the working conference on Advanced visual interfaces (AVI2006)*, ACM Press, pp. 43–50.
- ▶ Couture, N., And Rivière, G. 2007. Table interactive et interface tangible pour les géosciences : retour d'expérience. In *Actes de la 19ème Conférence Francophone sur l'Interaction Homme-Machine (IHM'07)*, ACM Press, pp. 23–26.
- ▶ Couture, N., Rivière, G., And Reuter, P. 2008. GeoTUI: A Tangible User Interface for Geoscience. In *Proceedings of the 2nd International Conference on Tangible and Embedded Interaction (TEI'08)*, ACM Press, pp. 89–96.

- ▶ Dubois, E. 2009. Conception, Implémentation et Evaluation de Systèmes Interactifs Mixtes : une Approche basée Modèles et centrée sur l'Interaction. Habilitation à Diriger les Recherches, Université de Toulouse, Mémoire.
- ▶ Dubois, E., Bortolaso, C., Appert, D., And Gauffre, G. 2014. An MDE-based framework to support the development of Mixed Interactive Systems, *Science of Computer Programming*, Volume 89, Part B, 199–221.
- ▶ Dubois, E., And Gray, P. 2007. A design-oriented information-flow refinement of the ASUR interaction model. In J. Gulliksen, M. Harning, P. Palanque, G. van der Veer, & J. Wesson (Eds.), *Proc. Int. Conf. on Engineering Interactive Systems (EIS'07)*, Springer volume 4940, 465–482.
- ▶ Dubois, E., Scapin, D. L., Charfi, S., And Bortolaso, C. 2013. Usability Recommendations for Mixed Interactive Systems: extraction and integration in a design process. In *Human factors in augmented reality environments*, W. Huang, L. Alem, M. Livingston (Eds.), Springer USA, 8, pp. 181–199.
- ▶ Dubois, E., Nigay, L., And Troccaz, J. 2001. Consistency in Augmented Reality Systems. In *Proceedings of the 8th IFIP International Conference on Engineering for Human-Computer Interaction (EHCI'01)*, pp. 111–122.
- ▶ Dourish, P. 2001. *Where the Action Is: The Foundations of Embodied Interaction*, MIT Press.
- ▶ Fitzmaurice, G., Ishii, H., and Buxton, W. 1995. Bricks: laying the foundations for graspable user interfaces. In *Proceeding of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI'95)*, ACM Press, pp. 442–449.
- ▶ Finkenzeller, K. 2003. *RFID Handbook: Fundamentals and Applications in Contactless Smart Cards and Identification*. John Wiley & Sons, New York.
- ▶ Fishkin, K. 2004. A taxonomy for and analysis of tangible interfaces. *Personal Ubiquitous Computing*, 8, 347–358.
- ▶ Follmer, S., Leithinger, D., Olwal, A., Hogge, A., and Ishii, H. 2013. inFORM: dynamic physical affordances and constraints through shape and object actuation. In *Proceedings of the 26th annual ACM symposium on User interface software and technology (UIST '13)*. ACM, New York, NY, USA, pp. 417–426.
- ▶ Garreau, L., Legardeur, J., And Couture, N. 2005. Une plateforme basée sur les interfaces tangibles pour l'assemblage en CFAO, *Interaction homme-machine et CAO (Revue internationale d'ingénierie numérique (RIIN))* 1(2), 133–148.
- ▶ Guiard, Y. 1987. Asymmetric division of labor in human skilled bimanual action: The kinematic chain as a model', *Journal of Motor Behavior* 19(4), 486–517.
- ▶ Hinckley, K., Pausch, R., Goble, J., And Kassell, N. 1994. Passive Real-World Interface Props for Neurosurgical Visualization. In *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems (CHI '94)*, ACM, New York, NY, USA, pp. 452–458.
- ▶ Holmquist, L.E., Redström, J., and Ljungstrand, P. 1999. Token-based access to digital information, in *Proceedings of the 1st International Symposium on Handheld and Ubiquitous Computing (HUC '99)*, Springer-Verlag, 1999, pp. 234–245,.
- ▶ Hornecker, E., And Buur, J. 2006. Getting a grip on tangible interaction: A framework on physical space and social interaction. In *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems (CHI 2006)*, ACM Press, pp. 436–446.
- ▶ Hornecker, E., Jacob, R. J. K., Hummels, C., Ullmer, B., Schmidt, A., van den Hoven, E., And Mazalek, A. 2008. TEI goes on: Tangible and embedded interaction, *IEEE Pervasive Computing* 7, pp. 91–96.
- ▶ Hornecker, E. 2012. Beyond affordance. In *Proceedings of the Sixth International Conference on Tangible, Embedded and Embodied Interaction (TEI '12)*, ACM Press, New York, USA, pp. 175–182. Hosokawa, T., Takeda, Y., Shioiri, N., Hirano, M., And Tanaka, K. 2008. Tangible design support system using RFID technology. In *Proceedings of the 2nd international conference on Tangible and embedded interaction (TEI '08)*, ACM, 2008, pp. 75–78

- ▶ Hurtienne, J., And Israel, J. H. 2007. Image schemas and their metaphorical extensions: intuitive patterns for tangible interaction. In Proceedings of the 1st international conference on Tangible and embedded interaction (TEI'07), ACM Press, pp. 127–134.
- ▶ Ishii, H., And Ullmer, B. 1997. Tangible bits: towards seamless interfaces between people, bits and atoms. In Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems (CHI'97), ACM, New York, NY, USA, 1997, pp. 234–241.
- ▶ Ishii, H. 2008a. Tangible bits: beyond pixels. In Proceedings of the 2nd international conference on Tangible and embedded interaction (TEI '08), ACM, New York, NY, USA, pp. xv–xxv.
- ▶ Ishii, H. 2008b. The tangible user interface and its evolution. *Comm. ACM*, 51, 32–36.
- ▶ Jacob, R. J. K., Girouard, A., Hirshfield, L. M., Horn, M. S., Shaer, O., Solovey, E. T., And Zigelbaum, J. 2008. Reality-based interaction: a framework for post-WIMP interfaces. In Proceeding of the twenty sixth annual SIGCHI conference on Human factors in computing systems (CHI 08), ACM Press, pp. 201–210.
- ▶ Johnson, M. P., Wilson, A., Blumberg, B., Kline, C., And Bobick, A. 1999. Sympathetic interfaces: using a plush toy to direct synthetic characters. Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems: the CHI is the limit (CHI'99), ACM, pp. 152–158.
- ▶ Jordà, S., Geiger, G., Alonso, M., And Kaltenbrunner, M. 2007. The reacTable: exploring the synergy between live music performance and tabletop tangible interfaces. In Proceedings of the 1st international conference on Tangible and embedded interaction (TEI '07), ACM, 2007, pp. 139–146.
- ▶ Kaltenbrunner, M., And Bencina, R. 2007. reacTIVision: a computer-vision framework for table-based tangible interaction. In Proceedings of the 1st international conference on Tangible and embedded interaction (TEI '07), ACM, 2007, pp. 69–74.
- ▶ Kaltenbrunner, M., Jorda, S., Geiger, G., And Alonso, M. 2006. The reacTable: A Collaborative Musical Instrument. In Proceedings of the 15th IEEE International Workshops on Enabling Technologies: Infrastructure for Collaborative Enterprises (WETICE '06), IEEE Computer Society, 2006, pp. 406–411.
- ▶ Kitamura, Y., Itoh, Y., And Kishino, F. 2001. Real-time 3d interaction with activecube. In Extended Abstracts on Human factors in computing systems (CHI EA'01), pp. 355–356.
- ▶ Koleva, B., Benford, S., Ng, K. H., And Rodden, T. 2003. A framework for tangible user interfaces. In workshop Proc. on Real World User Interfaces, Mobile HCI Conference 03, pp. 257–264.
- ▶ Kubicki, S., Lebrun, Y., Lepreux, S., Adam, E., Kolski, C., And Mandiau, R. 2013. Simulation in contexts involving an interactive table and tangible objects. *Simulation Modelling Practice and Theory* 31: 116-131, 2013.
- ▶ Lakoff, G., And Johnson, M. 1980. *Metaphors we live by*. University of Chicago Press.
- ▶ Lamata, P., Ali, W., Cano, A., Cornella, J., Declerck, J., Elle, O. J., Freudenthal, A., Furtado, H., Kalkofen, D., Naerum, E., Samset, E., Sánchez-Gonzalez, P., Sánchez-Margallo, F. M., Schmalstieg, D., Sette, M., Stüdeli, T., Sloten, J. V., And Gómez, E. J. 2010. Augmented reality for minimally invasive surgery: Overview and some recent advances. In S. Maad (Ed.), *Augmented Reality*. Croatia: InTech.
- ▶ Larousse, 2013. Dictionnaire de la langue Française <http://www.larousse.fr/dictionnaires/francais>.
- ▶ Le Goc, M., Dragicevic, P., Huron, S., Boy, S., And Fekete, J-D. SmartTokens: Embedding Motion and Grip Sensing in Small Tangible Objects. In Proceedings of the 28th ACM Symposium on User Interface Software and Technology (UIST '15). *To appear in November 2015*.
- ▶ Lebrun, Y., Adam, E., Mandiau, R., And Kolski, C. 2013. Interaction between tangible and virtual agents on interactive tables: Principles and case study. In E. Shakshuki, K. Djouani, M. Sheng, M. Younis, E. Vaz, W. Groszko (Ed.), *The 4th International Conference on Ambient Systems, Networks and Technologies* (June 25-28, Halifax, Nova Scotia, Canada), Elsevier, pp. 32–39.
- ▶ Leganchuk, A., Zhai, S., And Buxton, W. 1998. Manual and cognitive benefits of two-handed input: an experimental study, 5(4), 326–359.

- ▶ Lepreux, S., Castet, J., Couture, N., Dubois, E., Kolski, C., Kubicki, S., Maquil, V And Rivière, G. 2016. Interaction Tangible sur Table, un cadre fédérateur. *Journal d'Interaction Personne-Système*, sous presse.
- ▶ Lepreux, S., Kubicki, S., Kolski, C., And Caelen, J. 2012. From Centralized interactive tabletops to Distributed surfaces: the Tangiget concept. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 28, pp. 709–721.
- ▶ Macaranas, A., Antle, A. N., And Riecke, B. E. 2012. Bridging the gap. In *Proceedings of the Sixth International Conference on Tangible, Embedded and Embodied Interaction, TEI '12* (p. 161). New York, New York, USA: ACM Press.
- ▶ Mackay, W. E., Fayard, A.-L., Frobert, L., And Médini, L. 1998. Reinventing the familiar: exploring an augmented reality design space for air traffic control. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '98)*. New York, NY, USA: ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co, pp. 558–565.
- ▶ Maquil, V., Ras, E., And Zephir, O. 2011. Understanding the characteristics of metaphors in tangible user interfaces. In *Mensch & Computer 2011* (pp. 1–6).
- ▶ Maquil, V., Zephir, O., And Ras, E. 2012. Creating metaphors for tangible user interfaces in collaborative urban planning: Questions for designers and developers. In J. Dugdale, C. Masclet, M. A. Grasso, J.-F. Boujut, & P. Hassanaly (Eds.), *From Research to Practice in the Design of Cooperative Systems: Results and Open Challenges* (pp. 137–151). Springer London.
- ▶ Maximo, A., Saba, M. P., Velho, L. 2009. CollecTable: a natural interface for music collections *SIGGRAPH '09: SIGGRAPH '09: Posters*, ACM, 2009, 1-1.
- ▶ McGee, D., And Cohen, P. R. 2001. Creating tangible interfaces by augmenting physical objects with multimodal language. In *Proceedings of the 6th international conference on Intelligent user interfaces (IUI '01)*, New York, NY, USA: ACM, pp. 113–119.
- ▶ Mellado, N, Reuter, P., And Schlick, C. 2010. Semi-automatic geometry-driven reassembly of fractured archeological objects. In *Proceedings of the 11th International conference on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage (VAST'10)*, A. Artusi, M. Joly, G. Lucet, D. Pitzalis, and A. Ribes (Eds.). Eurographics Association, Aire-la-Ville, Switzerland, pp. 33–38.
- ▶ Müller-Tomfelde, C. 2010. *Tabletops - Horizontal Interactive Displays*. Human-Computer Interaction Series, Springer, ISBN 978-1-84996-112-7.
- ▶ Norman, D. 1999. Affordance, conventions, and design, *Interactions* 6(3), 38–43.
- ▶ Olwal, A., And Wilson, A. D. 2008. SurfaceFusion: unobtrusive tracking of everyday objects in tangible user interfaces. In *Proceedings of graphics interface (GI '08)*, Canadian Information Processing Society, 2008, pp. 235–242.
- ▶ Oppl, S., And Sary, C. 2011. Towards informed metaphor selection for TUIs. In *Proceedings of the 3rd ACM SIGCHI symposium on Engineering interactive computing systems (EICS'11)*. New York, NY, USA: ACM, pp. 247–252.
- ▶ Pangaro, G., Maynes-Aminzade, D., and Ishii, H. 2002. The actuated workbench: computer-controlled actuation in tabletop tangible interfaces. In *Proceedings of the 15th annual ACM symposium on User interface software and technology (UIST '02)*, New York, NY, USA, 2002. ACM, pp. 181–190.
- ▶ Patten, J., And Ishii, H. 2007. Mechanical constraints as computational constraints in tabletop tangible interfaces. In *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems (CHI '07)*, ACM, pp. 809–818.
- ▶ Patten, J., Ishii, H., Hines, J., And Pangaro, G. 2001. SenseTable: a wireless object tracking platform for tangible user interfaces. In *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems (CHI'01)*, ACM, 2001, pp. 253–260.
- ▶ Patten, J., Recht, B., And Ishii, H. 2002. Audiopad: a tag-based interface for musical performance. In *Proceedings of the 2002 conference on New interfaces for musical expression (NIME '02)*, National University of Singapore, 2002, pp. 1–6.

- ▶ Piper, B., And Ratti, C. 2002. Illuminating clay: a 3-D tangible interface for landscape analysis. Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems (CHI'02), ACM, pp. 355–362.
- ▶ Raffle, H. S., Parkes, A. J., And Ishii, H. 2004. Topobo: a constructive assembly system with kinetic memory. Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems (pp. 647–654). ACM.
- ▶ Reuter, P., Rivière, G., Couture, N., Mahut, S., and Espinasse, L. 2010. ArcheoTUI - Driving virtual reassemblies with tangible 3D interaction. Journal on Computing and Cultural Heritage, 3 (2), pp. 4:1–4:13.
- ▶ Reuter, P., Rivière, G., Couture, N., Sorraing, N., Espinasse, L., and Vergnieux, R. 2007. ArcheoTUI - A Tangible User Interface for the Virtual Reassembly of Fractured Archeological Objects. In Proceedings of the 8th EuroGraphics International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage, Eurographics Association, pp. 15–22.
- ▶ Rivière, G., And Couture, N. 2008. The Design of a Tribal Tabletop. In Proceedings of the Third IEEE International Workshop on Horizontal Interactive Human-Computer Systems (Tabletop '08), IEEE Computer Society, pp. 29–30. extended abstract and poster.
- ▶ Sato, T., Mamiya, H., Koike, H., And Fukuchi, K. 2009. PhotoelasticTouch : Transparent Rubbery Tangible Interface using an LCD and Photoelasticity. Science And Technology, 43–50.
- ▶ Shaer, O., Leland, N., Calvillo-Gamez, E. H., And Jacob, R. J. K. 2004. The TAC paradigm: specifying tangible user interfaces. Personal and Ubiquitous Computing, 8 (5), pp. 359–369.
- ▶ Shaer, O., And Hornecker, E. 2010. Tangible user interfaces: Past, present, and future directions. Found. Trends Hum.-Comput. Interact., 3, 1–137.
- ▶ Shen Y. T. and Mazalek, A. 2010. PuzzleTale: A tangible puzzle game for interactive storytelling. Comput. Entertain. 8 (2), pp. 11:1–11:15.
- ▶ Ståhl, O., Wallberg, A., Söderberg, J., Humble, J., Fahlén, L. E., Bullock, A., And Lundberg, J. 2002. Information exploration using The Pond CVE '02: Proceedings of the 4th international conference on Collaborative virtual environments, ACM, 2002, pp. 72–79.
- ▶ Takouachet, N., Couture, N., Reuter, P., Joyot, P., Rivière, G., And Verdon, N. 2012. Tangible user interfaces for physically-based deformation: design principles and first prototype. The Visual Computer Journal (TCVJ), 28(6-8), 799–808.
- ▶ Ullmer, B., And Ishii, H. 1997. Tangible bits: towards seamless interfaces between people, bits and atoms. In Proceedings of the ACM SIGCHI Conference on Human factors in computing systems (CHI '97). ACM, New York, NY, USA, pp. 234–241.
- ▶ Ullmer, B., And Ishii, H. 2000. Emerging frameworks for tangible user interfaces. IBM Syst. J., 39, 915–931.
- ▶ Ullmer, B., And Ishii, H. 2003. Tangible query interfaces: Physically constrained tokens for manipulating database queries. Human-computer interaction: Interact '03, pp. 279–286.
- ▶ Ullmer, B., Ishii, H., And Jacob, R. 2005. Token+constraint systems for tangible interaction with digital information. ACM Trans. Comput.-Hum. Interact., 12, 81–118.
- ▶ Underkoffler, J., And Ishii, H. 1999. URP: a luminous-tangible workbench for urban planning and design. In Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems (CHI '99), ACM Press, pp. 386–393.
- ▶ Vaananen, K., And Schmidt, J. 1994. User interfaces for hypermedia: how to find good metaphors? In Conference companion on Human factors in computing systems (CHI '94), ACM, pp. 263–264.
- ▶ Wallace, J., And Scott, S. 2008. Contextual Design Considerations for Co-located, Collaborative Tables. In Proceedings of the Third IEEE International Workshop on Horizontal Interactive Human-Computer Systems (Tabletop 2008), IEEE Computer Society Press, Los Alamitos, CA, USA, pp. 61-68.

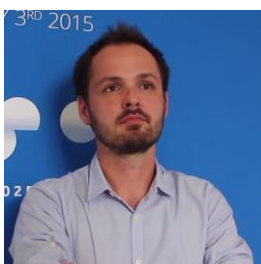
- ▶ Weiss, M., Schwarz, F., Jakubowski, S., and Borchers, J. 2010. Madgets: actuating widgets on interactive tabletops. In Proceedings of the 23rd annual ACM symposium on User interface software and technology (UIST '10), New York, NY, USA, 2010. ACM, pp. 293–302.
- ▶ Weiss, M., Wagner, J., Jansen, Y., Jennings, R., Khoshabeh, R., Hollan, J. D., And Borchers, J. 2009a. SLAP widgets: bridging the gap between virtual and physical controls on tabletops. In Proceedings of the 27th international conference on Human factors in computing systems (CHI '09), ACM, 2009, pp. 481–490.
- ▶ Weiss, M., Wagner, J., Jennings, R., Jansen, Y., Khoshabeh, R., Hollan, J. D., And Borchers, J. 2009b. SLAPbook: tangible widgets on multi-touch tables in groupware environments. In Proceedings of the 3rd International Conference on Tangible and Embedded Interaction (TEI '09), ACM, 2009, pp. 297–300.
- ▶ Wellner, P. 1991. The DigitalDesk calculator: tangible manipulation on a desk top display. In Proceedings of the 4th annual ACM symposium on User interface software and technology (UIST '91). ACM, New York, NY, USA, 1991, pp. 27–33.
- ▶ Zuckerman, O., And Arida, S. 2005. Extending tangible interfaces for education: digital montessori-inspired manipulatives. Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems (CHI'05), ACM, pp. 859–868.

8 BIOGRAPHIE



Sophie LEPREUX

est maître de conférences à l'Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis. Docteur en Informatique (Université de Valenciennes, 2005), Elle mène ses recherches au sein du LAMIH - UMR CNRS 8201 dans le domaine des Interactions Homme-Machine (adaptation au contexte, composition d'IHM, Interfaces distribuées, etc.). Elle a co-encadré des thèses en informatique dans le domaine des interactions tangibles sur table et participé à des projets ANR sur ce thème et participe à des comités de relectures de conférences nationales, internationales et des revues dans le domaine de l'interaction homme-machine.



Julien CASTET

a intégré le département R&D d'Immersion en 2012. Julien a soutenu une thèse en informatique à l'Institut National Polytechnique de Grenoble en 2010, où il a contribué au design et au développement d'un simulateur physique équipé d'un dispositif d'interaction à retour d'effort proposant des degrés de liberté variables. Il a ensuite réalisé plusieurs séjours post doctoraux à l'université de McGill et à l'université de Bordeaux autour de problématiques proches. Dans une volonté d'appliquer ces compétences à l'industrie, Julien a rejoint l'équipe d'Immersion où il dirige maintenant les activités de recherche en cours dans la société.



Nadine COUTURE

est Professeur en Informatique à l'ESTIA, l'Ecole Supérieure des Technologies Industrielles Avancées. Elle a obtenu le doctorat en 1994 et l'HDR en 2010. Elle enseigne les fondamentaux de l'informatique aux élèves ingénieurs, Algorithmiques, Technologies du Web, Langages de Programmation, Systèmes Mobiles. Ses recherches sont menées à Estia-Recherche, UPR de l'ESTIA, dont elle est responsable, et au LaBRI, UMR CNRS 5800 de l'Université de Bordeaux. Ses recherches, depuis 2001, portent sur l'Interaction Homme-Machine, et plus précisément sur l'Interaction Tangible, de l'incarnation physique des données vers l'interaction avec tout le corps.



Emmanuel DUBOIS

is Professor of Computer Science at the University of Toulouse, leading the Elipse Group (IRIT lab). The Elipse group is specialized in the design, modeling and experimentation of advanced HCI (tangible, mixed and augmented reality, tactile and gestural UI, assistive technologies) in complex interactive context (3D, mass market, disabilities). In this context, E. Dubois is focusing on the design, implementation and evaluation of interaction techniques based on tangible interfaces and interactive surfaces in the field of 3D and multi-dimensional data exploration. He also has a long experience on models and methods for reasoning about, designing and implementing advanced user's interaction techniques. His main application domains are related to knowledge transfer (museum, learning center) and applications for the interactive visualization of large data sets (monitoring, public service management).



Christophe KOLSKI

est Professeur en Informatique à l'Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis. Il a obtenu le doctorat en 1989 et l'HDR en 1995. Il enseigne le Génie Logiciel et l'Interaction Homme-Machine. Ses recherches sont menées au LAMIH-UMR CNRS 8201. Elles portent sur l'Interaction Homme-Machine, le génie logiciel pour les systèmes interactifs, les interfaces intelligentes, ainsi que sur l'interaction tangible et distribuée.



Sébastien KUBICKI

est Maître de Conférences à l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Brest depuis 2012. Il a obtenu son doctorat en Informatique (Université de Valenciennes) en décembre 2011. Actuellement, il mène ses recherches au Lab-STICC UMR 6285 dans l'équipe IHSEV (Interaction Humain Système et Environnement Virtuel) située au CERV (Centre Européen de Réalité Virtuelle). Il est spécialisé dans le domaine de l'Interaction Homme-Machine (IHM), systèmes adaptatifs et nouvelles interfaces utilisateurs tangibles telles que les Tables Interactives avec objets Tangibles (TIT). Actuellement, son axe de recherches porte sur l'étude du potentiel des TIT pour favoriser les apprentissages en classe.



Valérie MAQUIL

est chercheur au Luxembourg Institute of Science and Technology (LIST) à Esch-sur-Alzette, Luxembourg. Docteur en Informatique (TU Vienne, 2010), elle a une expertise de plus de 10 ans sur les interfaces tangibles, les méthodes de conception participatifs, ainsi que les études empiriques. Elle a participé à de nombreux projets de recherche financés par l'union européenne (H2020, INTERREG, ERASMUS+, FP6) portant sur les tables tangibles dans des scénarios collaboratifs de conception, de prise de décision, et de résolution de problèmes.



Guillaume RIVIÈRE

est enseignant-chercheur à l'école d'ingénieurs ESTIA et chercheur au LaBRI, UMR CNRS 5800, depuis 2010. Il a obtenu son doctorat de l'Université de Bordeaux en 2009 sur l'application en Géosciences des Interfaces Tangibles basées sur Tables Interactives. Son centre d'intérêt principal est de démontrer les propriétés des interfaces utilisateurs tangibles avec des prototypes implantant des tâches métiers.