

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 (Finkensteller, 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.

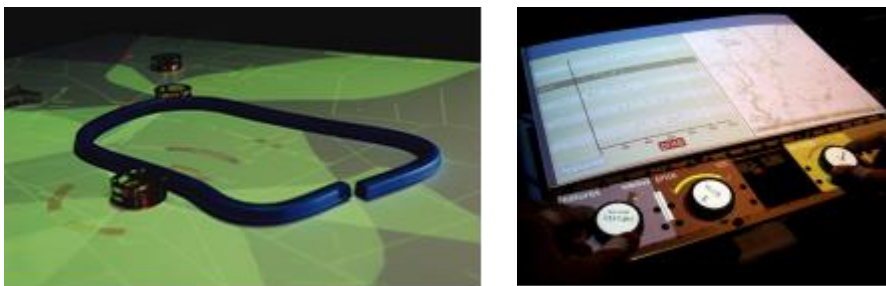
3.1 Manipulations spatiales

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))

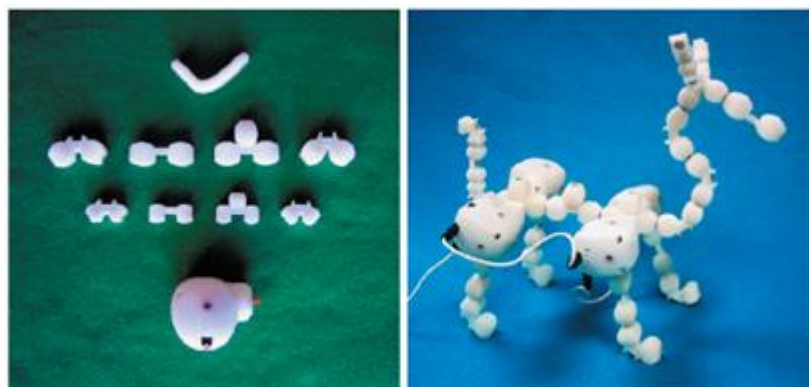


Figure 3. Le système PuzzleTale est utilisé par un sujet (à gauche). Celui-ci doit guider l'acteur principal (celui intégré dans la narration liée au jeu) afin qu'il arrive à destination, extrait de (Shen & Mazalek, 2010)



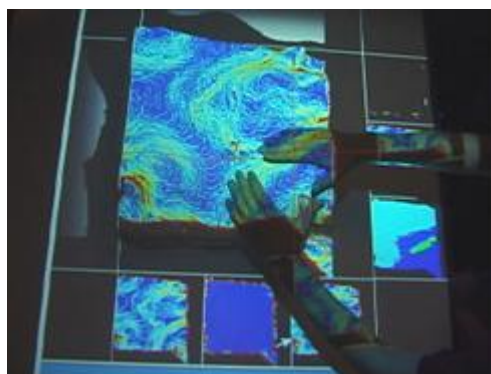
Les systèmes présentés dans cette section nécessitent un support de type horizontal large, de type table, pour faciliter l'assemblage. Ils ont été présentés ici, car même si dans leur version actuelle ils n'impliquent pas tous explicitement de table interactive, il nous paraît clair que celles-ci présentent 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

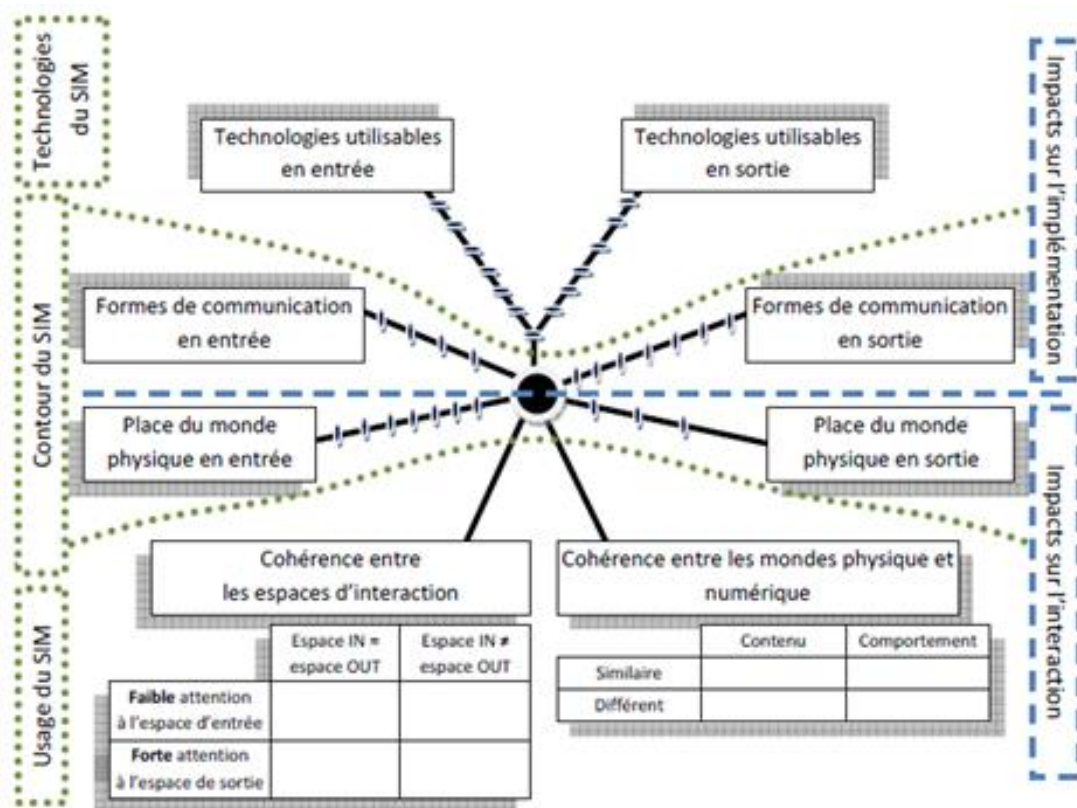
Le monde physique peut occuper différentes places dans un SIM et ainsi contribuer de différentes manières à la communication avec le système informatique. En effet, un SIM peut s'appuyer sur le monde physique en entrée et peut avoir un impact sur le monde physique en sortie. En entrée, sept aspects physiques (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.

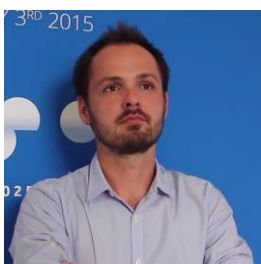
- ▶ Weiss, M., Schwarz, F., Jakubowski, S., and Borchers, J. 2010. Madgets: actuating widgets on interactive tabletops. In Proceedings of the 23rd annual ACM symposium on User interface software and technology (UIST '10), New York, NY, USA, 2010. ACM, pp. 293–302.
- ▶ Weiss, M., Wagner, J., Jansen, Y., 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.