



HAL
open science

Interaction tangible et coopérative

Jean Caelen, Christian Perrot

► **To cite this version:**

| Jean Caelen, Christian Perrot. Interaction tangible et coopérative. 2017. hal-02928335

HAL Id: hal-02928335

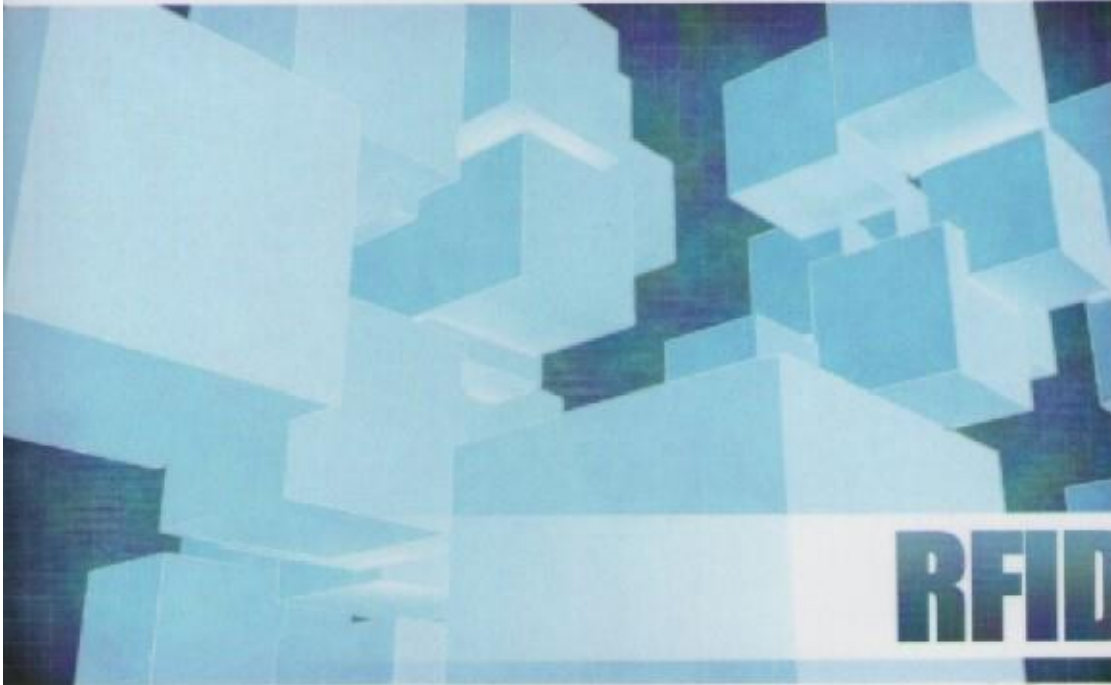
<https://hal.science/hal-02928335>

Submitted on 8 Sep 2020

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.

EUE EDITIONS
UNIVERSITAIRES
EUROPÉENNES



Christian Perrot
Jean Caelen

Interaction tangible et collaborative

Une étude de cas : la table TangiSense

Table des matières

| | |
|---|-----------|
| Table des matières | 1 |
| Résumé | 4 |
| Introduction | 5 |
| Nouveau paradigme d'interaction | 5 |
| Interface tangible | 6 |
| <i>Etat de l'art</i> | 6 |
| <i>La table Tangisense</i> | 10 |
| <i>Concepts utilisés</i> | 11 |
| <i>Caractéristiques générales</i> | 12 |
| <i>Les objets de la table</i> | 13 |
| <i>Architecture logicielle</i> | 15 |
| <i>Tangigets</i> | 20 |
| Réalisation technique | 21 |
| <i>Rappel sur la technologie RFID</i> | 21 |
| <i>Choix d'implémentation</i> | 23 |
| <i>Comment détecter des objets tangibles ?</i> | 23 |
| <i>Quelle norme RFID choisir ?</i> | 24 |
| <i>Premier prototype pour le projet ANR TTT</i> | 25 |
| <i>Seconde version pour le projet ANR IMAGIT</i> | 26 |
| <i>Quelle architecture du système d'information associé ?</i> | 27 |
| <i>Quel langage de programmation ?</i> | 28 |
| <i>Quel dispositif de retour d'information ?</i> | 31 |
| <i>Défis à relever</i> | 31 |
| <i>Tests de validation</i> | 32 |
| <i>Spécifications de la table Tangisense</i> | 33 |
| Evaluation ergonomique | 34 |
| <i>Interaction, postures, travail collectif</i> | 35 |
| <i>Comment évaluer une interface tangible ?</i> | 36 |
| <i>Affordance</i> | 37 |
| <i>Expérimentation</i> | 38 |
| <i>Contexte applicatif</i> | 39 |
| <i>Protocole expérimental</i> | 39 |
| <i>Résultats</i> | 40 |
| <i>Discussion</i> | 42 |

| | |
|---|-----------|
| Domaines d'application | 43 |
| La médiation tangible, le grand retour de l'intuitif | 43 |
| Cacher « l'informatique » | 43 |
| Créer l'affordance | 44 |
| Personnaliser l'interaction | 44 |
| Introduire une interaction évolutive | 44 |
| Susciter les échanges entre utilisateurs | 44 |
| Inverser la place de l'animateur | 45 |
| Ouvrir le champ de l'interaction gestuelle | 45 |
| La Biodiversité au bout des doigts | 45 |
| Déroulement du jeu | 46 |
| L'arbre qui ne cache plus la forêt | 47 |
| SoundSorting | 49 |
| Jeu du RISK | 52 |
| Maquettes de laboratoire | 53 |
| Simulation de cas d'usage | 54 |
| Perspectives | 55 |
| Est-ce encore trop tôt ? | 55 |
| Et pourtant, | 56 |
| Un environnement propice | 56 |
| Conclusion | 57 |
| Bibliographie | 58 |

Résumé

Cet ouvrage présente une table interactive dite « tangible » car elle utilise les objets du quotidien pour interagir avec le monde numérique. Ce dernier est largement dominé par les écrans graphiques et tactiles qui lui donne ce côté « artificiel » ou « expert » et concourt à la fracture numérique. Tangisense désigne une gamme de surfaces interactives innovantes - de toutes tailles - à base de dalles interagissant avec tout objet physique muni d'étiquettes RFID se mouvant à sa surface. Sa technologie permet de détecter des objets porteurs de badges RFID sur un écran TFT, et au travers de cartes, de nappes, de maquettes en bois, de supports plastiques, etc., jusqu'à 3 cm d'épaisseur. Ainsi, Tangisense, est une interface ouverte, basée sur un logiciel en Java sous forme de primitives facilement accessibles dans tous les environnements, et peut devenir un outil de médiation tous public pour le travail collaboratif.

L'ouvrage présente des cas concrets d'utilisation en création musicale, en travail collaboratif, à travers un outil pédagogique efficace - car elle mobilise moins de charge cognitive que les interfaces virtuelles ou la souris et elle est bien adaptée en milieu scolaire, robuste et facile à mettre en œuvre au service de l'enseignement en ateliers – ou pour la gestion de crise - en raison de ses capacités à communiquer à distance sur le réseau IP avec d'autres tables, et à coordonner des acteurs divers peu familiers avec les technologies numériques virtuelles.

Introduction

L'interaction homme-machine a subi depuis le début de l'informatique des évolutions techniques et ergonomiques pour s'adapter de mieux en mieux aux nouveaux utilisateurs. Les pionniers utilisaient des cartes perforées, héritées des machines mécanographiques, puis les premiers écrans sont apparus pour remplacer des kilomètres de papier imprimé. De fil en aiguille, claviers et souris sont venus peupler notre univers en s'ajoutant aux écrans d'abord alphabétiques (le minitel par exemple) puis graphiques. S'adressant de plus en plus aux utilisateurs non-spécialistes, il fallait également que la manipulation de cet outil à-tout-faire qu'est devenu maintenant le smartphone, devienne « intuitive » et « conviviale », même si personne ne sait exactement ce que veulent dire ces termes. On aura noté qu'au passage les interfaces sont devenues « tactiles » permettant d'interagir directement sur l'écran avec un langage gestuel plus ou moins convenu.

Or il existe bien d'autres façons d'utiliser des outils, pour travailler comme pour communiquer, des outils adaptés depuis très longtemps par des civilisations très diverses. Pourrait-on travailler avec des outils sans poids, sans masse en construction mécanique ou dans le bâtiment ? Pourquoi continue-t-on de fabriquer des jeux d'échec avec des pièces physiques alors que depuis longtemps on aurait pu poser de simples cartes sur des cases ? Il en va ainsi de la matérialité de ce monde et de ses représentations en trois dimensions qu'il vaut mieux intégrer que de chercher à les détourner.

L'interaction tangible part de ce constat pour réfléchir, concevoir et réaliser des systèmes d'interaction homme-machine (IHM) qui redonnent à l'objet physique ses capacités d'action et de représentation dans un monde numérique.

Nouveau paradigme d'interaction

Depuis 25 ans, les interfaces tangibles (TUI = Tangible User Interface) se répandent de plus en plus (Blackwell et al., 2007), au point qu'elle pourraient, à terme, remplacer l'interface graphique classique d'un ordinateur pour certaines applications comme les jeux, le travail de conception participatif, le maquettage, etc. (Kubicki et al., 2009a). La définition qu'en donnent Ishii et Ullmer (1997) est très succincte mais facilement compréhensible : il s'agit de manipuler des objets réels qui sont intégrés dans un environnement virtuel et qui ont des capacités numériques d'interaction – il ne s'agit donc plus seulement ici d'interagir avec des objets virtuels sur un écran. Ainsi, les TUI permettent de ne pas intercaler une couche de communication supplémentaire

dans le processus sensori-moteur qui s'établit entre l'utilisateur et l'environnement informatique ni de briser la continuité du toucher créée par la souris comme dans les interfaces graphiques (Moggridge, 2006).

Dans une interface tangible, les objets utilisés sont physiques mais dotés de capacités numériques d'interaction (Blackwell et al., 2007) en quelque sorte ils sont « augmentés ». En d'autres termes, tout se passe comme si « l'information numérique devenait directement palpable par les mains et perceptible par nos sens périphériques » (Ishii et al., 2001).

Dans ce type d'interface tangible, l'objet est à la fois outil de l'interface, de l'interaction et dispositif de l'interaction, ce qui pose son statut ambivalent. De plus l'interaction est spatiale, elle se déroule dans l'espace réel et les utilisateurs se déplacent dans cet espace afin d'interagir. A l'inverse de l'interaction avec un écran d'ordinateur où l'individu doit manipuler la souris, les interfaces tangibles requièrent diverses postures corporelles. En effet, les objets et l'espace conditionnent les comportements et la relation aux autres : l'individu est dans ce cas littéralement dans le monde physique et métaphoriquement dans le monde numérique. Cela définit donc des postures qui permettent, dirigent ou limitent les comportements. Enfin, les représentations sont externalisées, le feedback peut être visuel, tactile ou encore haptique (Hornecker et Buur, 2006).

Il faut distinguer ces interfaces tangibles des robots qui sont par eux-mêmes des interfaces entre l'homme et le monde qui agissent sur le monde physique. Le robot est lui-même plus ou moins autonome d'une part et possède une interface homme-machine pour recevoir les instructions de l'utilisateur d'autre part. On ne peut donc le considérer comme une pure interface tangible au sens que l'on va développer ci-après : une interface tangible permet d'utiliser des objets physiques ordinaires et des artefacts matériels pour interagir dans un monde numérique. Cette interaction peut-être collective et collaborative, ce qui en étend encore plus les champs d'application. Mais au-delà de cela le travail coopératif permet de tisser un autre langage de communication par l'action commune qui peut être source en lui-même de nouvelles formes d'interaction.

Interface tangible

Etat de l'art

On trouvera dans la littérature technique une multitude de tables et d'interfaces tangibles. Par exemple celle-ci, sur la figure 1.



Fig. 1 : Table tangible Reactable

Dans ce type de table on distingue un écran qui visualise des objets virtuels mais aussi interagit avec des cubes auxquels elle est sensible en position et en rotation. Il est évident que ce genre de table invite à jouer ou à travailler à plusieurs. Dans ce cas les objets physiques sont immergés dans un univers numérique et sont utilisés comme des outils dans ce monde.

Mais on trouve aussi tout autre type de table comme celle de la figure 2, dans laquelle le concept même de représentation tangible est différent : il s'agit de redonner une « texture » 3D à la surface avec laquelle on interagit.

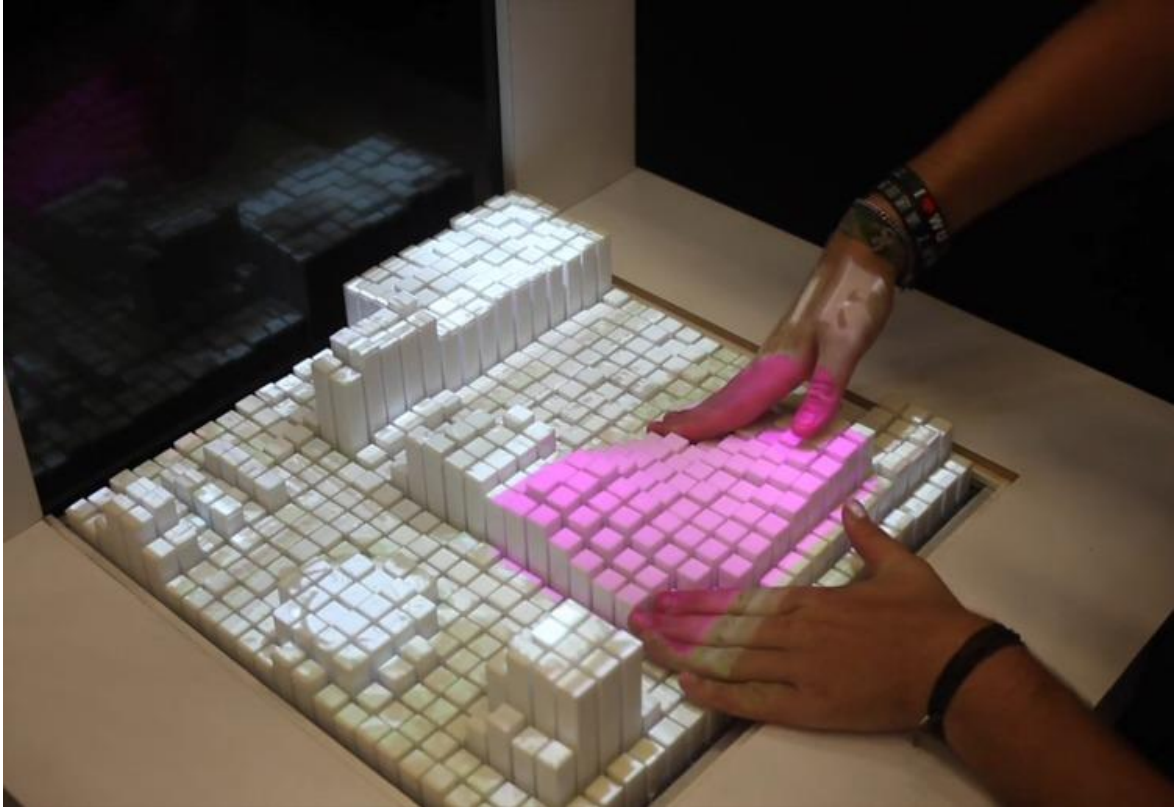


Fig. 2 : Interface tangible du Tangible Media Group du MIT.

Dans cette interface, les formes en relief sont appelées des « zooids ». En pratique ces zooids mesurent 2 cm de diamètre et répondent à un ordinateur qui leur envoie des commandes par lumière structurée à laquelle ils réagissent comme des pixels. Dans ce cas c'est l'espace lui-même qui se déforme pour « visualiser » des données numériques que l'on peut aussi « toucher ».

Un tout autre domaine d'interaction gestuelle concerne l'utilisation de gant, comme sur la figure 3, qui permet d'échanger des données numériques dans un monde physique par le biais de capteurs corporels.



Fig. 3 : Frontline, gants connectés pour pompiers.

Ces gants permettent aux pompiers de communiquer par un ensemble de gestes conventionnels, tout en travaillant. Ils peuvent ainsi communiquer et se coordonner dans un environnement fortement enfumé et avec peu de visibilité.

Ces trois exemples, parmi tant d'autres, permettent de se rendre compte de ce que l'on entend par interface tangible mais en même temps jette un certain trouble sur une définition de ce qu'est une interface tangible. On trouve dans Wikipedia la définition suivante¹ : « Une interface utilisateur tangible est une interface sur laquelle l'utilisateur interagit avec l'information numérique par le moyen de l'environnement physique. L'objectif de développement des interfaces utilisateur tangibles est d'encourager la collaboration, l'éducation et le design (conception) en donnant à l'information digitale une forme physique, profitant ainsi des capacités humaines de saisir et de manipuler des objets physiques et des matériaux »

Selon Mi Jeong Kim and Mary Lou Maher², les cinq propriétés fondamentales pour définir des interfaces utilisateur tangibles sont les suivantes :

¹ Ishii, H. 2008. Tangible bits: beyond pixels. In Proceedings of the 2nd international Conference on Tangible and Embedded interaction (Bonn, Germany, February 18–20, 2008). TEI '08. ACM, New York, NY, xv-xxv.

² Mi Jeong Kim, Mary Lou Maher : The impact of tangible user interfaces on spatial cognition during collaborative design. In: Design Studies, Vol 29, No. 3, May 2008

- Espace-multiplex à la fois entrée et sortie,
- L'accès simultané et la manipulation de composants d'interface,
- Des dispositifs spécifiques puissants,
- Des dispositifs de calcul spatialement conscients,
- La re-configurabilité spatiale des dispositifs.

Cette taxonomie n'est guère convaincante car beaucoup trop générale et vague. De nombreux chercheurs ont proposé d'autres définitions et parmi elles nous retiendrons la définition-synthèse suivante par Nadine Couture : « *en considérant l'utilisateur comme le point de référence de la taxonomie, de qualifier l'interaction tangible « à petits grains » lorsque, l'on interagit avec de petits objets que l'utilisateur peut attraper et bouger dans un espace qui est délimité par l'envergure de ses bras. L'interaction tangible est alors « à gros grains » lorsque l'interaction implique le corps entier et s'opère au sein d'espaces interactifs. Dans ce cas, l'utilisateur interagit avec de grands objets, au sein de grand espaces, de fait, l'utilisateur du système doit bouger parmi et autour de ces objets avec tout son corps. La technologie est alors « dans » le corps, dans les vêtements, les rendant d'une certaine façon tangibles. On notera que le terme original « Interface Utilisateur Tangible » se situe dans l'interaction tangible à petits grains. »*

Avec cette définition nous trouvons bien une dichotomie des interfaces des figures 1 et 2 (à petit grain) et de la figure 3 (à gros grains), mais nous ne pouvons pas distinguer les interfaces 1 et 2, la première utilise plutôt les objets physiques « en entrée » du monde numérique et la seconde plutôt « en sortie » de ce monde numérique.

La table *Tangisense*

La table interactive tangible *Tangisense* que nous allons décrire maintenant entre dans la catégorie des interfaces tangibles à petits grains et – selon la convention complémentaire ci-dessus – en entrée d'un monde numérique. Elle a été développée dans le cadre de deux projets ANR (Agence Nationale de la Recherche), le premier TTT – avec les partenaires LIG/MultiCom, université de Grenoble, porteur du projet, CEA/LETI Grenoble, LAMIH université de Valenciennes et RFIDEES PME de Voiron – sur la période 2008-2009, et le deuxième IMAGIT – avec les partenaires, LIG/MultiCom, université de Grenoble, porteur du projet, LAMIH université de Valenciennes et RFIDEES PME de Voiron – sur la période 2010-2011, soit 4 années consécutives.

Le projet IMAGIT (Environnement multi-acteurs multi-tables interactives à objets tangibles et virtuels) consistait à concevoir, réaliser et tester un

environnement permettant à un ensemble d'utilisateurs (isolés ou en groupe(s)) d'interagir de manière distribuée à l'aide d'un ensemble de tables ou tablettes interactives permettant d'exploiter des objets aussi bien tangibles que virtuels, et devaient aussi permettre la connexion de différents autres dispositifs à la table (ou aux tables), dans la mesure où certains utilisateurs peuvent être équipés de tablettes ou ordinateurs portables. Les situations à étudier et mettre en œuvre concernent aussi bien des objets tangibles embarquant de l'information (avec ou sans écriture durant les contextes d'usage) que des objets pour lesquels l'information est déportée dans des agents d'une plateforme multi-agents. Cette plateforme mettait donc en œuvre des interactions entre acteurs aussi bien humains que virtuels.

Ce projet s'appuyait sur les résultats obtenus dans le cadre du précédent projet ANR TTT (Table d'interaction avec des objets Tangibles et Traçables) dont le but était de concevoir et de prototyper une table tangible avec des matrices d'antennes RFID. Durant ce projet, une première table interactive appelé TangiSense avait été développée, et avait fait l'objet de premiers démonstrateurs qui ont eu un impact notable dans plusieurs manifestations :

- salon mondial de la créativité à Sestrie, Italie, à l'automne 2009 où TangiSense a été dévoilée en avant-première,
- de la meilleure démonstration lors de la conférence IHM'2009 à Grenoble,
- très bon accueil lors des démonstrations durant le 2ème Colloque STIC de l'ANR "Quelle recherche pour les STIC de demain ?" (5-7 janvier 2010).

De plus, des modules plus simples issus de la technologie de TangiSense permettant de réaliser des scénarios d'objets traçables (Domotique, Publicité Lieu de Ventes), ont été réalisés pour démonstration et test d'usage – ce qui en montrait l'intérêt pour de plus petites surfaces, pour des domaines non classiques et valider la technologie avec plusieurs tables interconnectées.

Concepts utilisés

La figure 4 présente la table interactive qui se présente globalement comme une rétine magnétique capable de détecter et de localiser des étiquettes RFID collées sous des objets quelconques. La table prototype est composée de 25 dalles contenant chacune 64 antennes (8 x 8) de 2,5 cm de côté sur une surface de 1 m². Chaque dalle contient son processeur de traitement et de lecture des antennes RFID, son multiplexeur d'antennes et son processeur de communication. Les dalles sont associées entre elles par une interface de contrôle reliée à l'ordinateur hôte par un bus Ethernet.

Caractéristiques générales

Avec la technologie employée, il est possible de reconnaître des objets superposés les uns sur les autres et leur position individuelle dans l'espace de travail de la table. On peut donc détecter qu'un objet est caché sous un autre plus grand que lui, déterminer sa position ou son contenu grâce au stockage d'informations dans les mémoires RFID embarquées dans l'étiquette. Le temps de réponse obtenu grâce à la communication Ethernet et la lecture RFID offre des performances de vitesse compatibles avec la vitesse d'un geste humain. Le déplacement simultané d'un pavé de 64 étiquettes RFID est détecté en moins d'une seconde, impliquant une détection possible de plus de 60 objets en mouvement à la fois. La capacité à faire cohabiter des antennes très proches sans interaction est également nouvelle. Enfin, les algorithmes enfouis dans les dalles offrent des stratégies de recherche, d'agrégation et d'échange entre les étiquettes RFID permettant des temps de traitement en temps réel.

Avec ces caractéristiques un ou plusieurs utilisateurs peuvent déplacer simultanément plusieurs objets à la surface de la table. Ils peuvent être détectés lorsqu'on les pose après un mouvement ou lorsque on les glisse en les maintenant jusqu'à une certaine hauteur au-dessus de la table (typiquement 5 cm). La fig. 4 donne une configuration de la table : une plaque en verre sur lequel des objets peuvent glisser/se déplacer et produire des actions ayant un retour lumineux sur la table. Les objets sont donc des interacteurs ou médiateurs entre l'utilisateur humain et la table « numérique ».



Figure 4 : la table Tangisense ici dans une configuration de création musicale. Des zones lumineuses (leds dans la table) sont activées par des « personnages » tangibles. Un cube en premier plan représente un instrument de musique, un CD en deuxième plan représente une base de données de sons que l'on peut « déverser » sur la table. La table se présente comme une matrice carrée de « pixels » magnétiques (40 x 40).

Les objets de la table

On distingue deux types d'objets différents pouvant servir d'interacteurs : (a) les objets virtuels (comme dans une interface graphique, les fenêtres, ascenseurs, boutons, *widgets* de toutes sortes, etc.) et (b) tangibles. Les objets virtuels sont projetés sur la table à l'aide d'un écran LCD placé en surface de la table ou d'un vidéo projecteur placé verticalement au-dessus de la table (Fig. 5) ou tout autre système comme des matrices de Led sur la fig. 4. Les objets tangibles sont munis d'étiquettes RFID collées sur leur base. Ces étiquettes – encore appelées tag en anglais - comportent des *puces*, dans lesquelles il est possible de stocker des informations. Ces informations peuvent aider à l'identification de l'objet, à stocker ses propriétés, son historique, etc.

La fig. 5 montre une autre configuration de la table, sur laquelle le monde numérique est projeté sur la surface et les objets sont manipulés dans cette

représentation 2D. La localisation des objets se fait alors en deux temps : a) localisation de l'image sur la table puis b) localisation de l'objet sur la table. Ce double référencement nécessite donc une mise au point au préalable.



Figure 5 : la table TangiSense utilisée dans une application de simulation de trafic routier. On y distingue les objets tangibles (panneaux routiers par exemple) et les objets virtuels vidéo-projetés (routes par exemple).

Dans cette application de simulation de trafic routier (Kubicki *et al.*, 2009a, 2010) l'interface montre un ensemble d'infrastructures routières pour la gestion du trafic routier destinée aux experts en sécurité, architecture, transports, etc. Elle vise à d'apporter une aide à l'étude et la régulation du trafic en réduisant par exemple l'attente aux feux, à la simulation de situations d'accidents, ou à l'anticipation d'actions des véhicules afin d'émettre des hypothèses pour fluidifier le trafic. Dans ce cas, à la table interactive *TangiSense* (Fig. 5), peut correspondre un réseau autoroutier sur lequel des objets tangibles de type infrastructure ou signalisation sont déplacés par le ou les utilisateur(s).

L'interface est composée d'une carte routière (dessinée et vidéo-projetée sur la table à partir de données provenant d'un système d'informations cartographiques) sur laquelle évoluent des véhicules simulés. Le but est ici de venir modifier la circulation en apposant un ensemble d'objets (Panneaux STOP, feux tricolores, etc.), d'étudier l'implication sur la circulation et permettre d'émettre des hypothèses quant à la circulation, la fluidité du trafic

routier, etc. C'est un exemple typique où des objets tangibles visent à faciliter la réalisation de tâches expertes collectives.

Plusieurs applications ont été programmées pour la table, dont on donne un aperçu dans le paragraphe *Domaines d'application*.

Architecture logicielle

Afin d'interconnecter le monde physique et le monde numérique, il y a lieu de banaliser les objets physiques et les objets numériques sous une même abstraction : les objets java. Pour cela on affecte une ou plusieurs étiquettes RFID à un objet physique qu'il s'agira ensuite de détecter et de reconnaître sur la table. A cette (série) d'étiquette(s) sera associée un objet java dont les propriétés seront celles de l'objet physique – comme forme, couleur, etc. - et un rôle et/ou un comportement. Ainsi, du point de vue logiciel un objet physique et un objet virtuel ont la même représentation interne. Ils peuvent donc être manipulés de manière indistincte dans tout type d'application.

Parmi ces objets il y en a qui sont génériques, c'est-à-dire réutilisables d'une application à une autre, on les appelle *tangigets* à l'image des *widgets* des interfaces graphiques (voir détail plus loin).

L'architecture logicielle de la table est relativement simple. Elle est constituée de diverses couches logicielles comme l'indique la figure 6. Au-dessus de ces couches, des applications quelconques pourront être déployées, la table n'étant somme toute qu'une interface homme-machine quelconque.

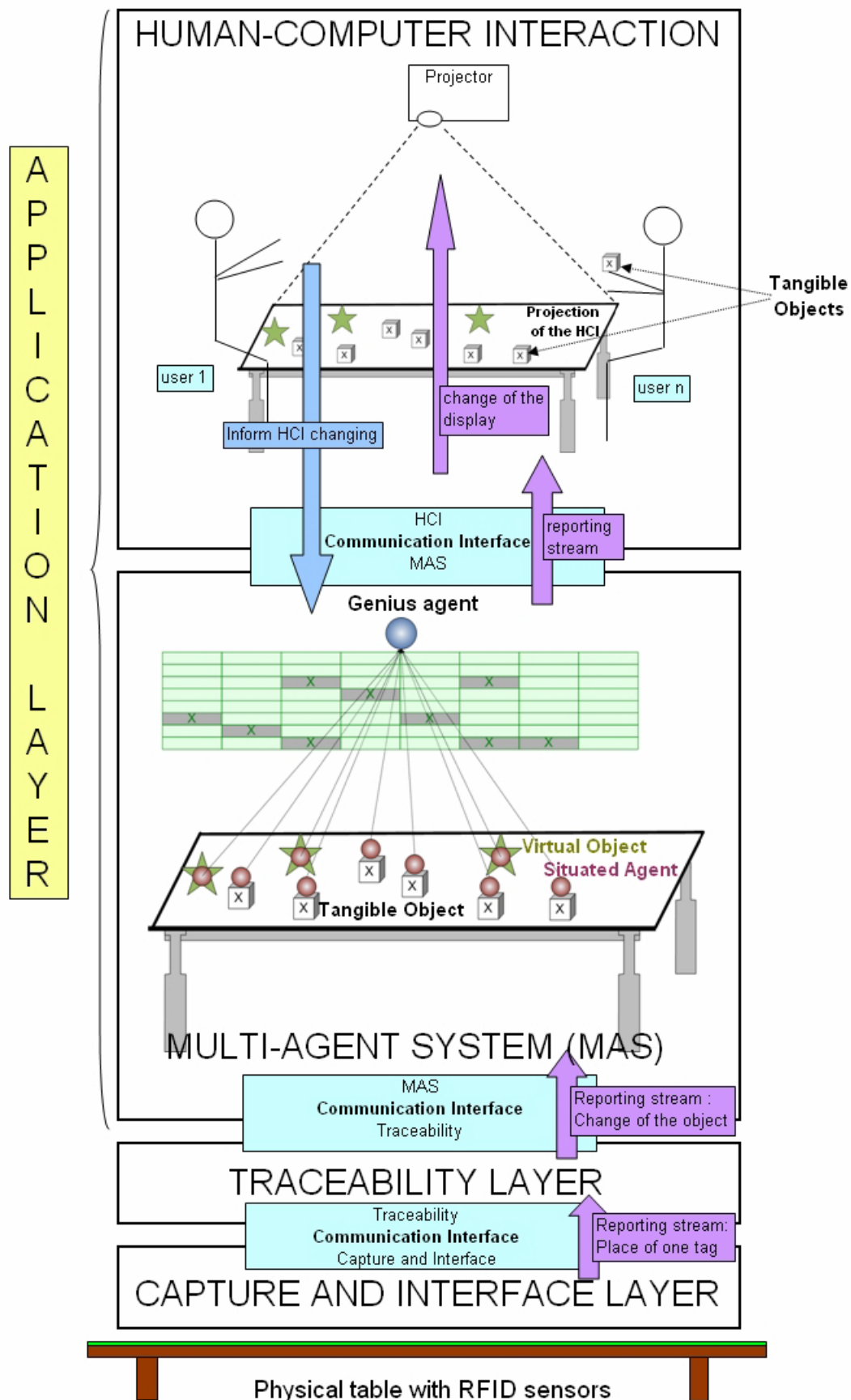


Fig. 6 : Architecture logicielle de TangiSense. Explications dans le texte.

- La couche « basse » comprend la capture des événements issus de la détection des étiquettes RFID par la couche physique de la table et la création d'objets Java associant ces événements à un objet,
- La couche « intermédiaire » gère les objets en termes de position, de recouvrement ou de forme - si ceux-ci sont déformables et qu'ils comportent plusieurs étiquettes,
- La couche « haute » ou couche applicative gère les applications associées à la table. Il peut y avoir par exemple un système multi-agent pour conférer une certaine « intelligence » à la table dans la gestion autonome des objets. Ceux-ci peuvent être définis en termes de *tangigets*, c'est-à-dire des objets abstraits ayant des comportements définis et réutilisables. Pour la clarté de la programmation on peut diviser cette couche logicielle en deux sous-couches :
 - La sous-couche applicative intégrant par exemple un système multi-agent et un superviseur général appelé *genius-agent* (sur la figure 6 – ce *genius-agent* est un agent spécifique de coordination des autres agents),
 - La sous-couche IHM (Interface Homme-Machine) proprement dite permettant de gérer les actions et les informations vis-à-vis des utilisateurs et d'intégrer directement les *tangigets* dans cette couche puisqu'ils ont des comportements définis, identiques pour toutes les applications.

Le fonctionnement peut-être décrit rapidement à l'aide du scénario suivant, figure 7 :

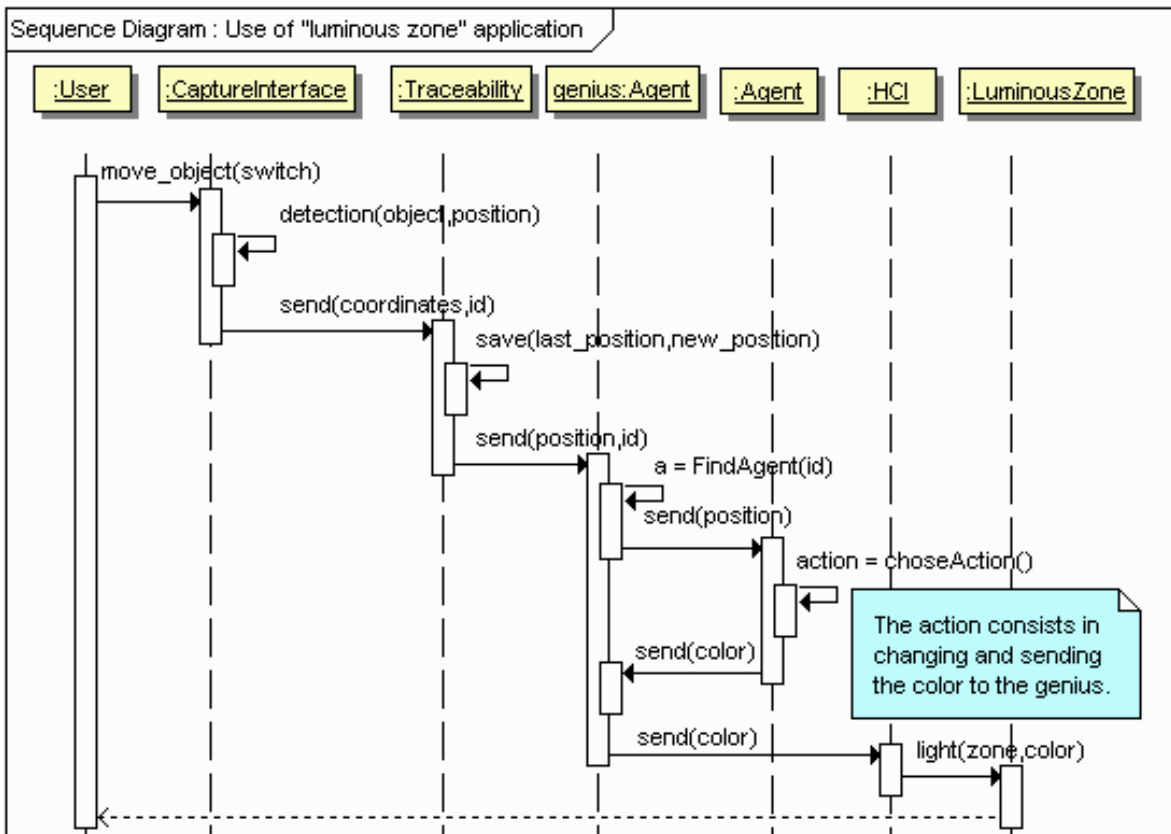


Fig. 7 : L'utilisateur manipule un objet « switch light » pour allumer une certaine zone de la table. La figure montre les différentes étapes de traitement, les échanges entre les couches et l'organisation des agents-objets.

La figure 8 montre l'initialisation d'un nouvel objet et la procédure d'affectation d'un rôle et d'un comportement à cet objet.

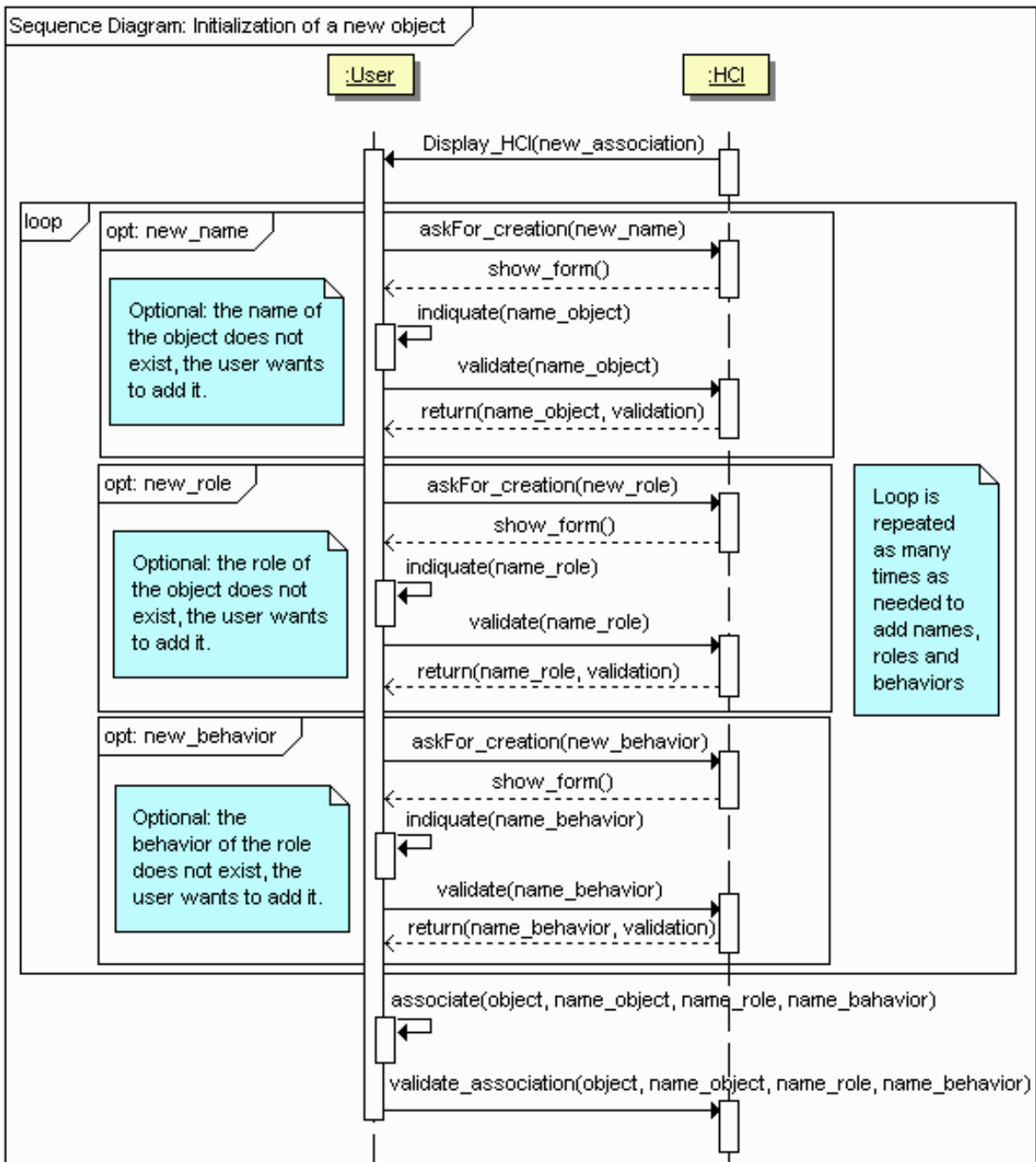


Fig. 8 : Création d'un nouvel objet : initialisation et affectation de son rôle et de son comportement.

Il est évidemment possible l'interconnecter plusieurs tables entre elles ou avec d'autres dispositifs (par exemple des smartphones pour communiquer par un canal audio) pour favoriser le travail collaboratif à distance. L'architecture générale devient alors celle-ci (figure 9) :

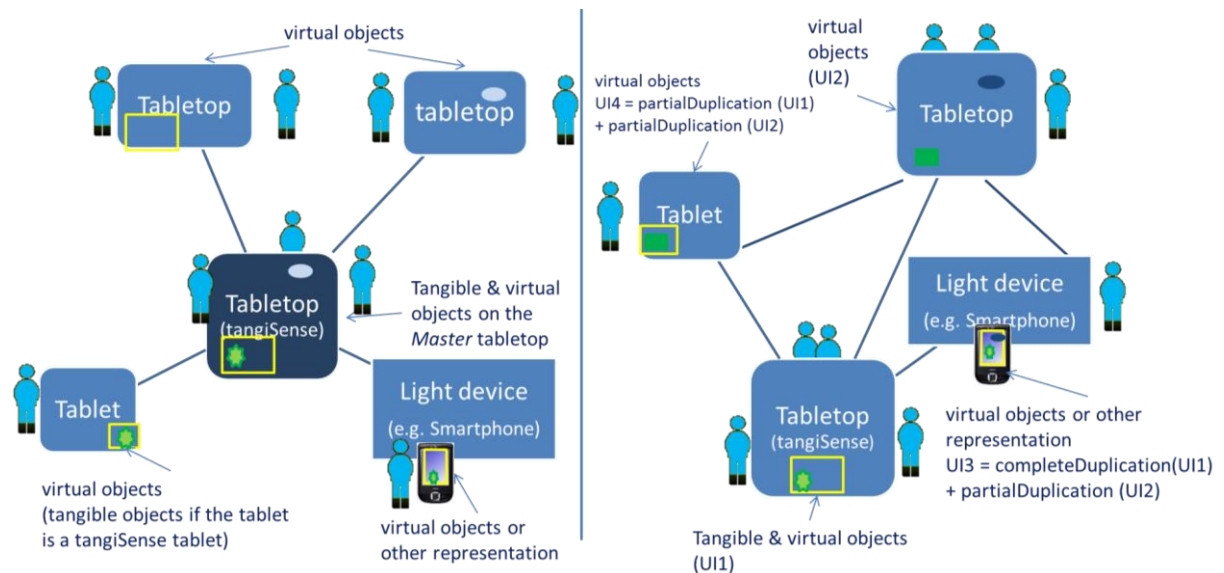


Fig. 9 : Cette figure montre une architecture distribuée autour d'une table « maître » (en noir sur la figure). Cette dernière porte l'application et centralise les données et les interactions. D'autres architectures plus réparties sont possibles mais nous ne nous attarderons pas sur cette question.

Tangigets

Une des spécificités de TangiSense est de posséder des *tangigets*. Les *tangigets* sont des objets génériques bien identifiés physiquement et réutilisables dans toutes les applications, par exemple une gomme pour effacer ce qui vient d'être affiché, un bouton « démarrage », etc. Leurs fonctions sont identiques d'une application à une autre. Ils se répartissent en 6 catégories :

- Objets de contrôle de l'application (comme sélection de l'application, démarrage, arrêt),
- Objets contexte de l'application (comme configuration, paramétrage d'une application, aide)
- Objets contrôle de l'interface (comme zooming, volume audio, profils d'utilisateurs, droits)
- Objets de communication à distance (comme connexion, déconnexion, pause, acquittements)
- Objets de coordination (comme envoi, réception, partage d'informations, synchronisation de tâches)
- Objets de création d'autres objets (comme création objet virtuel ou objet tangible, création de classe d'objets, association d'objets, groupement, suppression)

Tous ces objets ont une structure standard avec trois facettes P (présentation), A (Abstraction) et C (Contrôle) selon le modèle PAC (Coutaz, 1987) utilisé

en génie logiciel des IHM. Par exemple pour le dernier groupe f, le tangiget « créer un objet » se présente comme indiqué sur la figure 10 :

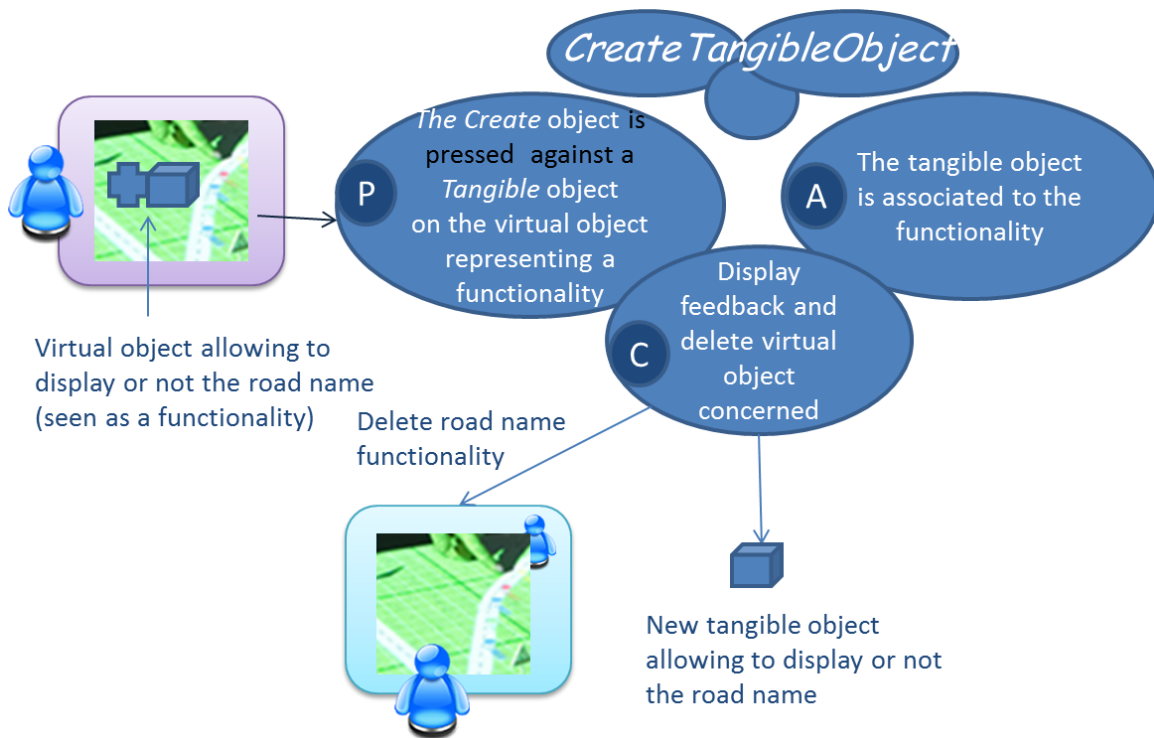


Fig. 10 : Modèle PAC du tangiget « créer un objet »

La facette *Présentation* décrit l'aspect physique de l'objet et éventuellement ses propriétés physiques si nécessaire (par exemple si l'objet est mou, compressible, superposable ou non, etc.).

La facette *Abstraction* gère le contexte d'interaction, en particulier les réactions de l'objet aux actions extérieures ou aux requêtes de l'utilisateur.

La facette *Contrôle* lie les deux facettes précédentes entre elles et gère leurs échanges.

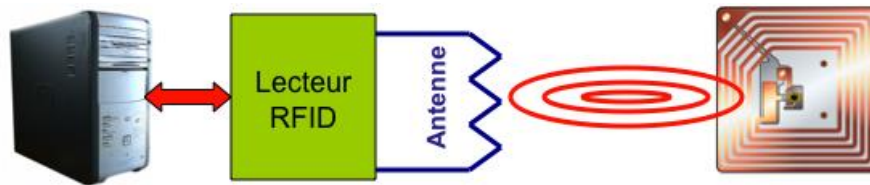
Réalisation technique

Rappel sur la technologie RFID

La technologie RFID (Radio Fréquence IDentifiant) fait partie des dispositifs d'interaction sans contact.

Elle met en œuvre :

- Une étiquette (ou tag) contenant une puce électronique connectée à une petite antenne,
- une plus grosse antenne connectée à un lecteur géré lui-même par un ordinateur.

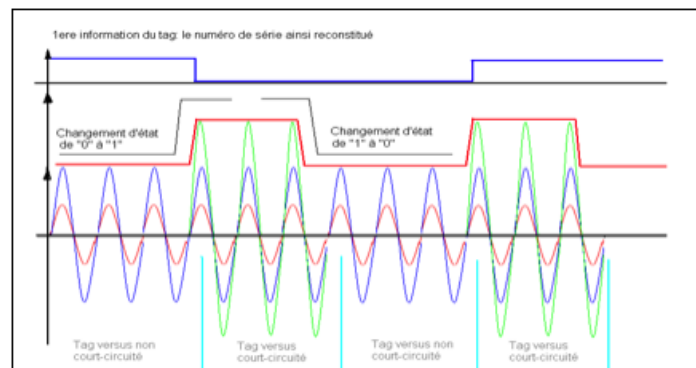


Le badge ne contient pas de pile ni accumulateur et puise son énergie dans le champ du lecteur dans lequel il se trouve plongé momentanément. En dehors de cette situation, la puce se "rendort" jusqu'au prochain couplage.

Lorsque la puce est activée, elle effectue des court-circuits sur son antenne ce qui crée des variations de couplage magnétique qui se traduisent par des variations de courant dans l'antenne du lecteur. Par cette méthode, la puce peut donc transmettre son identité ou d'autres informations.

Réciproquement, le lecteur peut moduler le champ magnétique pour transmettre des informations dans la mémoire de la puce (quelques centaines ou milliers d'octets).

Dans le diagramme ci-contre, on voit la fréquence porteuse sinusoïdale modulée (soit par la puce, soit par le lecteur) pour transmettre un bit égal à 1 ou à zéro. Le couplage entre la puce et le lecteur est donc une transmission dite "série" car les bits sont transmis les uns après les autres. Plus la fréquence de la porteuse est élevée, plus l'information est rapidement transmise.



Il existe trois familles principales de RFID en fonction de la fréquence de la porteuse :

- 128 KHz, utilisé principalement pour le marquage des animaux,
- 13,56 MHz, utilisé comme des tickets d'accès à des services (transports publics, ski, sport, accès aux immeubles, etc..). C'est cette famille qui est utilisée dans le projet Tangisense, en raison de son coût très accessible, de la bonne stabilité de détection, pour une application où une distance de détection de quelques centimètres est suffisante,
- 860 MHz, utilisé dans la logistique pour suivre des colis ou des palettes, pour des inventaires comme dans avions pour valider la

maintenance des sous-ensembles, pour la lutte contre la contrefaçon dans l'importation des vêtements, etc. Son couplage avec le lecteur est plus instable en raison des réflexions et des perturbations métalliques de l'environnement du fait de la fréquence élevée de la porteuse.

Le RFID est apparu dans les smartphones sous la dénomination "sans contact" ou encore NFC ("Near Field Communication") pour des applications de transaction commerciale en remplacement de la carte bancaire, qui d'ailleurs depuis peu embarque aussi des puces RFID. Le NFC est un protocole particulier qui s'appuie sur la technologie RFID 13,56 MHz.

En résumé :

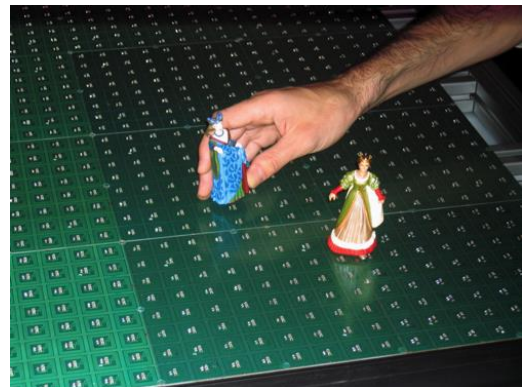
La rupture technologique du RFID se situe essentiellement à deux niveaux :

- sa capacité à enregistrer des informations sans énergie embarquée,
- en termes d'usages, son mode d'interaction transparent qui s'effectue à l'insu de l'utilisateur.

Choix d'implémentation

Comment détecter des objets tangibles ?

Pour détecter des objets tangibles sur une table, plusieurs solutions s'offraient au laboratoire. Des expériences avaient déjà eu lieu dans une autre équipe de recherche du LIG, dans la continuité des expériences du MIT aux US. La table « Surface » développée par Microsoft permet également de détecter des objets. Ces mises en œuvre utilisaient toutes une détection optique :



- Soit une caméra située au-dessus ou en-dessous de la table associée à une reconnaissance de forme des objets ou des doigts de l'utilisateur,
- Soit des codes à barre ou des motifs géométriques fixés sous les objets détectés par les capteurs de lumière CCD associés à chaque pixel de la table SAMSUNG commercialisée par Microsoft.

Ces technologies optiques présentent plusieurs inconvénients majeurs :

- La détection optique nécessite un environnement lumineux contrôlé. Il est impossible de l'utiliser en extérieur ou sous des tubes fluorescents comme on en rencontre en milieu industriel ou dans un grand magasin,
- Les objets ne sont pas dotés de mémoire propre, ce qui les empêche d'avoir une existence autonome, par exemple de garder en mémoire une trace de leurs mouvements antérieurs ou de changer leur identité ; mais également ce qui ne permet pas de les dissocier d'une table pour les utiliser sur une autre non reliée au même système d'information,
- La technologie de détection par caméra est très contraignante en termes de réglages et demande une importante puissance de calcul pour la reconnaissance de formes en temps réel,
- La technologie de détection par écran comportant des capteurs de lumière CCD associés à chaque pixel rend dépendant d'un format d'écran et d'un constructeur, ici la Sté SAMSUNG.

Pour toutes ces raisons, le choix s'est porté sur la technologie RFID, car elle apporte une solution robuste, pérenne, disposant de nombreuses secondes sources pour la fourniture des composants de base. Elle est basée sur des protocoles de communication ouverts (Open Source) normés par l'ISO.

De plus la technologie RFID dissocie complètement les fonctions capteur de position, de mouvement, et dialogue avec l'objet de la fonction de retour d'information qui peut alors s'effectuer sur un autre écran que la table, ou sous forme vocale ou sous forme d'actions.

Comme on le verra ci-dessous, la technologie RFID offre une grande liberté sur la taille des capteurs organisés sous forme matricielle, indépendamment de la forme de l'écran, et en l'absence de réglage du champ de vision d'une caméra.

Enfin, la technologie RFID permet de rendre à l'objet toute sa valeur en termes d'historique de sa vie, grâce à la mémoire embarquée dans la puce.

Quelle norme RFID choisir ?

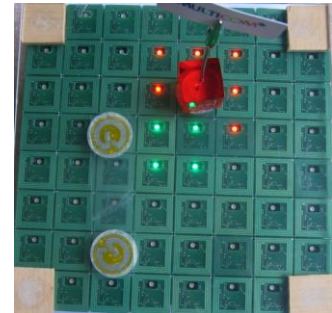
Tout d'abord, il a été exclu les objets actifs porteurs d'une pile ou d'une batterie, pour d'évidentes raisons d'autonomie, de facilité d'usage, d'encombrement, et de respect de l'environnement. De plus, ces objets utilisent en général des protocoles de communication fermés, ce qui n'était pas dans la philosophie du projet pour lui offrir des chances d'applications industrielles.

Il n'a pas été difficile de choisir le type de norme RFID. La technologie RFID VHF à 13,56 MHz ISO 15693 était bien adaptée au problème posé car elle offre un couplage magnétique stable, un excellent débit d'échange d'informations entre le lecteur et le badge. Il n'était pas nécessaire de choisir des RFID UHF car la distance de détection nécessaire ici est très réduite (on dit souvent "au contact"). Enfin, le RFID VHF 13,56 MHz supporte la collision (détection et encodage simultané de plusieurs badges), contrairement au RFID à 123 KHz, dont le débit d'échange d'informations est bien plus faible.

Avantage supplémentaire, il s'est trouvé qu'à l'époque à laquelle ont eu lieu les développements du matériel, la Sté RFidées nous a proposé de profiter des nouveaux circuits intégrés lecteurs-encodeurs RFID pour les smartphones visant le marché des transactions bancaires sans contact basés sur le protocole NFC, lui-même appuyé sur le protocole de communication VHF 13,56 MHz ISO 15693. Ce choix s'est révélé pertinent en termes de prix, avec des circuits intégrés disponibles à quelques Euros pièce.

Premier prototype pour le projet ANR TTT

Lors du premier projet ANR TTT, il a été choisi de regrouper 64 antennes de 3 cm sur une dalle carrée de 8 par 8 antennes, multiplexées devant un seul lecteur RFID. Le retour d'action était réalisé par une diode LED placée au milieu de chaque antenne.



Deux tables ont été réalisées, l'une pour le laboratoire LIG comprenant 25 dalles (5x5 dalles) formant une matrice carrée de 1600 antennes, et l'autre pour le CEA comprenant 15 dalles (3x5 dalles) formant une matrice de 960 antennes. L'intérêt pour le LIG de constituer une table carrée de plus d'un mètre de côté réside dans la possibilité d'organiser des séances de travail collaboratif. Cette table a été utilisée dans de nombreuses expériences du laboratoire pour valider les concepts d'interaction tangible, même si ses performances n'étaient pas aussi bonnes que la génération suivante du projet ANR IMAGIT décrit ci-dessous.



Ce prototype présentait les défauts

techniques suivants :

- Une forte consommation électrique due à la présence de 1600 diodes LED multicolores,
- Un accord difficile des antennes RFID en raison de leur disposition non uniforme à une distance variable pour accéder au multiplexeur,
- La perturbation de la lecture des badges RFID du fait des courants de commutation des diodes LED situées au milieu des antennes,
- L'impossibilité de disposer de vraies images en retour d'action avec les diodes LED, pour concurrencer les tables à reconnaissance optique d'objets tangibles.

Seconde version pour le projet ANR IMAGIT

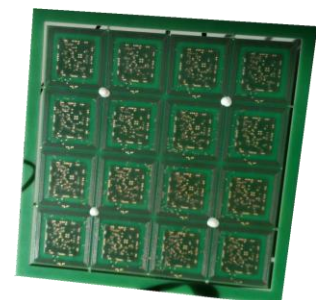
Une opportunité industrielle a permis de changer radicalement l'architecture physique de la matrice RFID. A la demande des constructeurs de smartphones, à l'exception de Apple, les sociétés Texas Instrument et STMicroelectronics ont développé une puce lecteur-encodeur RFID à connecter directement à une antenne. Le coût très faible de ce composant a révolutionné la mise en œuvre des dalles Tangisense.

Par ailleurs, il n'était plus possible de conserver le retour d'action par diodes LED, en raison des inconvénients énumérés ci-dessus. Il a été décidé de placer les dalles RFID sous un écran TFT de type grand public dédié à la télévision pour permettre d'afficher des images en retour d'action. On verra plus loin que le défi n'était pas facile à relever, mais que la Sté RFidees y est parvenu.

Quelles dimensions pour Tangisense ?

Libéré du carcan des capteurs optiques, le projet se trouvait en position d'imaginer une nouvelle mise en forme physique de ce nouveau détecteur d'objets tangibles. Il est apparu rapidement que le meilleur compromis en termes de prix, de complexité, et de possibilités d'association des dalles sous un écran TFT existant parmi les formats disponibles sur le marché, était de développer une dalle de 15 centimètres de côté.

Cette dalle contient maintenant 16 antennes embarquant un circuit intégré lecteur-encodeur RFID au centre de chaque antenne. Le motif étant toujours le même, la matrice peut se décliner à l'infini sur le circuit imprimé. Les dalles sont conçues pour se juxtaposer bord à bord "sans couture", c'est à dire de



telle manière que la distance entre les antennes reste la même.

Les informations numériques issues des lecteurs sont traitées par un microcontrôleur installé sur une carte fille fixée sous la matrice. Les dalles sont associées en réseau, sans limitation de nombre. La taille d'une antenne est de 1 pouce, soit 2,54 cm. La définition (précision de détection) est d'une demi-antenne.



Tangisense supporte tous les badges RFID ISO15693 du marché d'une taille au choix de l'utilisateur, et supporte le protocole de collision, c'est à dire la présence de badges multiples simultanément sur une même antenne.

Le laboratoire LIG a choisi de constituer cette seconde table Tangisense à partir de 24 dalles (6x4) de 16 antennes (4x4), soit une matrice de 384 antennes RFID.

Quelle architecture du système d'information associé ?

Tangisense est donc un capteur matriciel, constitué de blocs séparables, de 16 antennes, interconnectés et appelés "Dalles". Cette liberté de mise en œuvre devait se retrouver également dans le design du système d'information.

Toujours pour conserver la philosophie d'ouverture et de standardisation, les dalles sont interconnectées en réseau Ethernet par l'intermédiaire d'un Switch tout à fait classique. Au-dessus de la couche média Ethernet, et encore au-dessus de la couche réseau de protocole IP, il a finalement été choisi de se limiter au protocole UDP, sans implémenter une couche TCP plus lourde en terme de dialogue car garantissant l'intégrité de l'information de bout en bout. En effet, choisir UDP permettait de bénéficier d'un plus grand débit d'information, au risque de perdre des trames pendant les échanges. L'expérience et les tests de fiabilité de détection ont montré que ce risque était complètement négligeable au regard de la question de la stabilité de détection

des objets. Le flot très important d'information remonté par le microcontrôleur compense très largement une éventuelle collision de deux trames Ethernet.

Les dalles sont donc interconnectées par un Switch Ethernet dont le lien amont est relié à la carte réseau d'un ordinateur frontal. Cet ordinateur supporte la plus part du temps l'application et comporte une seconde carte réseau pour accéder à Internet. En effet, étant donné le fort trafic avec les dalles il est fortement conseillé de dédier une interface à cette fonction.

On devine donc qu'il est facile de distribuer plusieurs dispositifs Tangisense dans un musée par exemple ou dans un atelier, en les connectant sur un réseau Ethernet.

On voit également que Tangisense peut être un dispositif complètement séparé de l'écran de retour d'information comme expliqué plus loin.



Quel langage de programmation ?

Pour les dalles de la table

Les microcontrôleurs sont programmés en langage C. Le développement a été assuré par la Sté RFidées et fait partie de la fourniture du matériel. Aucune négociation n'a eu lieu pour lever la propriété industrielle de cette partie. Par contre le laboratoire a eu accès à la totalité des principes de conception et aux schémas.

Dans le mode de fonctionnement dit « **Autonome** », les dalles renvoient de l'information spontanément selon deux sous-modes :

- Dans le mode « **Autonome État** » la table envoie ses données périodiquement.

- Dans le mode « **Autonome Transition** » la table n'envoie ses données que lorsqu'un nouveau tag est détecté, ou qu'il se produit le déplacement d'un tag.
- Dans le mode dit « **Question/Réponse** », la table ne répond que sur sollicitation de l'ordinateur hôte.

Pour l'application sur l'ordinateur hôte

Le pilote (Driver) des dalles ainsi que les couches d'interface avec l'application située sur l'ordinateur hôte sont développés en langage Java. Ce travail de développement a été effectué par des ingénieurs recrutés par le laboratoire. Il est propriété académique mais accessible par l'intermédiaire de la filiale universitaire dédiée aux transferts de technologie.

Le choix de Java, en tant que langage objet, s'est imposé comme une évidence dans un environnement destiné précisément à gérer des objets tangibles. Par exemple, poser un objet sur Tangisense déclenche l'instanciation d'un objet Java.

Ce logiciel est structuré principalement en deux couches en dessous de l'application (voir l'architecture générale fig. 6) :

- La couche CI (**Capture et Interface**) gère l'interfaces réseau, le raccordement "sans couture" des dalles juxtaposées, le calcul de la position d'un objet à cheval sur plusieurs dalles. Cette couche assure également la stabilité de détection d'un objet (voir ci-dessous pourquoi dans le paragraphe sur les défis à relever). La comparaison des RSSI (Qualité du signal) permet de lever l'ambiguïté lorsqu'un badge RFID est détecté sur plusieurs antennes,
- La couche T (comme **Traçabilité**) agrège les informations de détection de badges RFID pour fournir à l'application une vision objet, en faisant abstraction des numéros des puces des badges (UID), en particulier pour les objets comportant plusieurs badges. Elle est capable également de fournir un historique des positions dans un fichier des traces. La couche se place au dessus de la couche CI afin de récupérer les informations « d'empreinte », c'est-à-dire, des ensemble d'étiquettes perçues. Son rôle fonctionnel est de transformer les remontées d'empreintes en objets localisés, de tracer ces objets, et de fournir des événements associés au niveau supérieur applicatif.

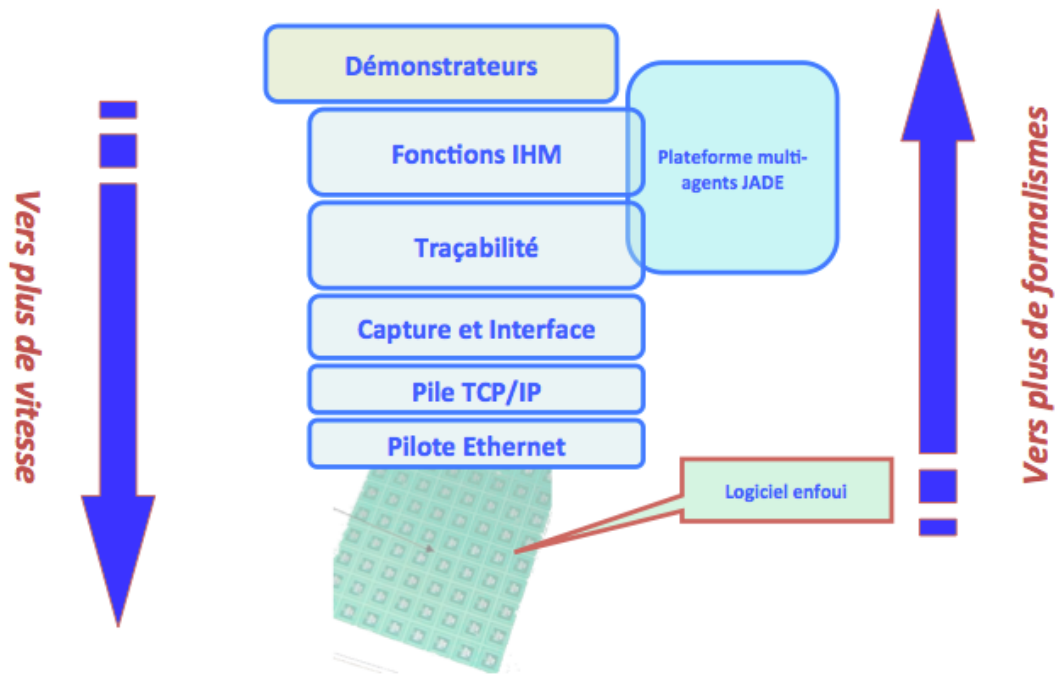


Fig. 11 : Déclinaison de l'architecture générale (Fig. 6) pour Tangisense.

Pour la communication Dalles-Ordinateur hôte

Le protocole de communication entre les microcontrôleurs des dalles et le pilote de l'ordinateur a été développé en collaboration entre le laboratoire LIG et la Sté RFiddes. Il est donc la propriété des deux parties.

Le format général des trames de commande émises en ASCII par l'ordinateur hôte est :

- STX | Commande | Corps de commande : | ETX | Horodatage

Le format général d'une réponse en ASCII émise par un microcontrôleur est :

- ACK ou SYN | STX | Commande :| Corps de commande | ETX | Horodatage

On dispose de commandes de configuration, de reconnaissance des dalles présentes et de commandes de lecture (read) ou d'écriture (write) dans les badges.

Exemple :

| | | | | | | | | |
|--------------|---|--|---|--|---|---|---|---|
| read | Question | <table border="1"> <tr> <td>X</td> <td>Y</td> <td>N</td> </tr> </table> X : coordonnée en X sur 1 caractère Y : coordonnée en Y sur 1 caractère N : numéro du bloc sur 2 caractères | | | X | Y | N | |
| | X | Y | N | | | | | |
| | Réponse | <table border="1"> <tr> <td>X</td> <td>Y</td> <td>N</td> <td>D</td> </tr> </table> D : données du bloc mémoire (8 caractères en ISO15693) | | | | X | Y | N |
| X | Y | N | D | | | | | |
| Commentaires | Les données du bloc mémoire sont des valeurs hexadécimales codées en ASCII (exemple : la valeur 0xAA est représentée par "AA"). | | | | | | | |

Quel dispositif de retour d'information ?

Lors de la première maquette de faisabilité de Tangisense sous forme de table carrée de un mètre de côté, il a été fait usage de diodes LED comme retour d'actions et d'informations. Si cette maquette a permis de débiter très tôt les travaux de recherche sur l'ergonomie de l'interaction tangible et le travail collaboratif, elle s'est avérée inadaptée à des réalisations industrielles à de nombreux exemplaires. En effet, le réseau de diodes LED augmentait considérablement le coût, posait des problèmes de consommation électrique et son implantation sur le circuit imprimé perturbait le fonctionnement des antennes.

Il s'est avéré nécessaire de dissocier la fonction capteur RFID propre à Tangisense de la fonction de retour d'information. Des développements ont donc eu lieu pour créer les Dalles Tangisense capables de fonctionner à travers un écran TFT à rétro-éclairage. Dans ce contexte, Tangisense est devenu une table 50 pouces de diagonale à l'égal de ses concurrentes à écran tactile et à détection optique de la position des objets. Les premières applications destinées à la médiation pour le Parc du Vercors ont montré la nécessité de séparer les retours d'actions et la carte du territoire affichés sur l'écran monté sur les Dalles, des informations de contenu affichées sur un écran déporté vertical posé à proximité de la table.

Mais l'écran n'est pas le seul retour d'actions ou de présentation d'information possible pour Tangisense. On verra dans le chapitre applications que le son ou l'ambiance en domotique peuvent remplir cette fonction.

Défis à relever

Le projet Tangisense posait un certain nombre de défis à relever :

- La juxtaposition des antennes RFID à moins d'un centimètre cause inévitablement la détection du badge sur plusieurs lecteurs, mais également ce qui est plus délicat, une perturbation du couplage magnétique entre le badge et l'antenne la plus proche de l'endroit où il se situe. Il a donc fallu adapter l'impédance des antennes pour

tenir compte de cette difficulté, ce qui a entraîné un design très spécial du circuit d'antenne. D'autre part, le microcontrôleur se devait de remonter au driver de la couche logicielle CI l'information de qualité du couplage (RSSI) pour toutes antennes en cours de détection de la position d'un badge, de manière à permettre un calcul de péréquation et en déduire la position réelle par interpolation,

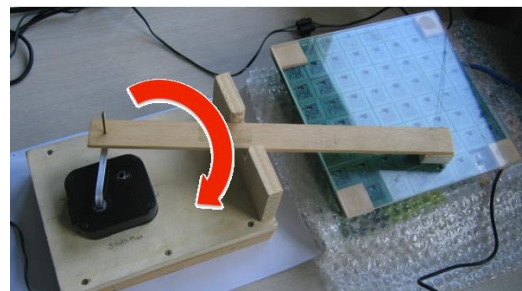
- Comme pour toute interaction magnétique, le couplage badge-antenne est intrinsèquement instable sur les antennes situées en périphérie de la position du badge. Il a fallu procéder au filtrage des informations brutes envoyées par les dalles, travail effectué par la couche CI,
- Il n'est pas possible, pour une matrice d'antennes comme celles des dalles Tangisense d'activer toutes antennes en même temps. Les antennes sont donc activées successivement selon plusieurs stratégies différentes qui peuvent être choisies lors de la conception de l'application. Ce choix a nécessité d'entrer plus finement dans le fonctionnement du couplage des badges avec les lecteurs, ce qui n'est pas l'objet de ce document.

Par contre, l'application dispose de modes d'interaction différents :

- Mode balayage systématique sur demande pour découvrir des badges RFID,
- Mode autonome dans lequel la dalle envoie des informations seulement lors de la présence d'un badge RFID,
- Mode de lecture ou écriture d'un badge RFID à une position précisée,
- Mode de masquage de la présence de certains badges sur demande momentanée de l'application,
- La vitesse de détection des mouvements des objets a nécessité un multiplexage des antennes suffisamment rapide par le microcontrôleur, sachant que la limite théorique est fixée par les spécifications du protocole de couplage ISO15693 entre le badge et le lecteur.

Tests de validation

De nombreux tests de validation ont été réalisés pour quantifier la fiabilité de détection.



Une dalle a été équipée d'un mécanisme de déplacement automatique d'un badge sur sa surface, associé à un logiciel de test comparant les valeurs relues à celles attendues pour ce badge. Les erreurs et leur contexte étaient enregistrés dans un fichier sur des durées de plusieurs jours. Les résultats ont montré une fiabilité de plus de 90%.

La précision de détection a été un souci constant dès le début du projet, ce qui a eu pour conséquence la recherche de la plus forte densité d'antennes sur la surface d'une Dalle. Les expériences d'ergonomie sur une table Tangisense ont rapidement montré que, contrairement aux dalles tactiles, la présence d'objets ne nécessite pas une grande précision de détection. En effet, les objets ne sont pas minuscules et la taille des doigts pour les manipuler doit entrer en ligne de compte. Autant un seul doigt est suffisant pour pointer une icône sur un écran tactile, alors que pour saisir et déplacer un objet, deux doigts sont nécessaires. Les membres du projet sont arrivés rapidement à la conclusion qu'une précision de détection comprise entre un demi-pouce et un pouce était largement suffisante sur les applications développées au laboratoire. *Un demi-pouce, n'est-ce pas la dimension d'un petit doigt !* La taille des antennes étant de un pouce carré, comment obtenir une précision presque deux fois plus importante ? C'est le calcul de la position du badge à cheval sur deux antennes, à partir de la lecture de la qualité du couplage (RSSI) comme évoqué ci-dessus, qui a permis ce gain de précision.

Par contre il est apparu un terme beaucoup plus important que la position dans l'interaction tangible, c'est le mouvement. En effet, sur une table tactile, le nombre de mouvements se limite à des balayages pour faire apparaître des volets, ou dans des logiciels de dessin vectoriels ou des commandes pour faire tourner des objets virtuels. Mais lorsque l'utilisateur dispose d'un objet Tangible, on se rend compte qu'il est beaucoup plus enclin à le déplacer. La détection de mouvements spécifiques complexes ouvre donc un champ nouveau d'interactions, comme il sera montré dans les applications ci-après. Il devient alors possible que Tangisense apprenne des mouvements de l'utilisateur pour créer un véritable dialogue gestuel.

Spécifications de la table Tangisense

- Tangisense est constitué de dalles interactives carrées de 15 cm de côté contenant 16 lecteurs RFID, fabriquées par la Sté RFidees,
- Antennes de 3 cm de coté, précision de détection 1,5 cm,
- Association d'un nombre illimité de dalles bord à bord,
- Protocole RFID ISO 15693,

- Dalles interconnectées en Ethernet protocole UDP sur réseau local dédié,
- Distance de détection verticale 3 cm (badges ISO 20 mm),
- Anticollision, jusqu'à 3 badges empilés séparés de 5 mm,
- Table 47 pouces 6 x 4 dalles de 16 antennes 114 cm x 69 cm épaisseur 45 mm,
- Bloc inférieur 50 x 43 cm Ep 10 cm (Switch & PC hôte),
- Diagonale écran 119 cm (47 pouces) Zone active RFID 90 cm x 60 cm,
- Consommation au repos 0,76 A. La consommation en activité dépend principalement de l'écran, soit moins de 1,5 A,
- Logiciel Java sous forme de primitives facilement accessibles dans tous les environnements, le développement a été effectué par le laboratoire LIG de Grenoble
- Programmes de tests et de réglage fournis par la Sté RFidées
- Tangisense peut être équipé d'un écran TFT muni d'une surface tactile.

Evaluation ergonomique

Depuis 25 ans maintenant, les interfaces tangibles (TUI = Tangible User Interface) sont de plus en plus répandues (Blackwell et al., 2007), et certains chercheurs vont jusqu'à dire « qu'à terme, une telle interface pourrait remplacer l'interface graphique classique d'un ordinateur pour certaines applications comme les jeux, le travail de conception participatif, le maquettage, etc. » (Kubicki et al., 2009b). La définition qu'en donnent Ishii et Ullmer (1997) est très succincte mais facilement compréhensible, il s'agit de manipuler des objets réels qui sont intégrés dans un environnement virtuel - en effet, tangible provient de « tangere », il ne s'agit donc plus seulement ici d'interagir avec des objets virtuels sur un écran, mais de manipuler de véritables objets physiques dotés de capacités numériques d'interaction. (Blackwell et al., 2007). Ainsi, les TUI évitent d'intercaler une interface de communication supplémentaire dans le processus sensori-moteur qui s'établit entre l'utilisateur et l'environnement informatique en brisant la barrière du toucher créé par la souris (Moggridge, 2006). Les objets utilisés sont donc physiques et dotés de capacités numériques d'interaction (Blackwell et al., 2007). En d'autres termes, l'information numérique est directement palpable par les mains et perceptible par les sens périphériques (Ishii et al., 2001). Ishii est l'un des pionniers dans le domaine des interfaces tangibles, il a défini un espace-problème autour des objets de l'interface : l'objet est à la fois outil de l'interface, de l'interaction et dispositif de l'interaction. L'interaction est

spatiale, elle se déroule dans l'espace réel et les utilisateurs se déplacent dans cet espace afin d'interagir. A l'inverse de l'interaction avec un écran d'ordinateur où l'individu doit manipuler la souris ou un autre dispositif, les interfaces tangibles requièrent d'autres postures corporelles et d'autres comportements. Enfin, les représentations sont externalisées, le feedback peut être visuel, tactile ou encore haptique (Hornecker et Buur, 2006). Dans ce paragraphe, nous évaluons la « tangibilité » par rapport à la mise au point et l'utilisation de la table interactive TangiSense, exploitant la technologie RFID comme décrit ci-dessus et permettant des interactions collectives autour d'objets tangibles et virtuels.

Interaction, postures, travail collectif

Interagir avec une interface tangible n'implique pas les mêmes postures corporelles ni la même spatialité qu'une interface graphique classique - même posée sur une table - et engendre de ce fait d'autres formes d'interaction. En effet, ce type de technologie permet à l'individu de vivre une expérience dite « naturaliste ». Selon (Ishii et al., 2001), cette interface lui donnerait le sentiment d'être « connecté au monde réel » et ainsi de mieux réussir son « biofeedback » c'est-à-dire un meilleur retour de ses actions à travers les objets qu'il manipule. Par l'intermédiaire de ce contrôle multi-sensoriel on a la possibilité d'avoir en retour une expressivité plus riche des gestes, ce qui permet des interactions plus naturelles et plus intuitives (Fiebrink et Morris, 2009). En outre, les interfaces tangibles donnent l'opportunité aux individus de toucher concrètement l'élément qu'ils veulent manipuler, ils peuvent alors en sentir la forme, le poids, etc. dans une interaction dans laquelle l'ensemble du corps est alors utilisé pour contrôler le monde numérique (Schneiderman, 1983). Par ailleurs, les individus pouvant changer la localisation des objets à la fois par rapport à eux mais également par rapport aux autres individus, agissent sur la spatialité des interactions et peuvent ainsi développer un raisonnement spatial (Manches et al., 2009). L'interaction avec les deux mains est rendue possible, ce qui enrichit les modes de manipulation des objets (Fitzmaurice et al., 1995). D'autre part, les individus peuvent se déplacer autour de la table pour améliorer la perspective de vision qu'ils ont des objets. Les avantages avec cette technologie sont donc multiples. Les artefacts physiques facilitent l'interaction en rendant l'interface plus directe et surtout plus manipulable. Ce type de technologie, encourage également la collaboration pour un usage collectif (Fitzmaurice et Buxton, 1997). Enfin, étant donné que les objets sont manipulés en trois dimensions sur une surface horizontale, la grande majorité de ces tables offrent un espace de travail généreux et permettent à l'utilisateur d'agir tout en parlant et en gardant un

œil sur ce que les autres font (Manches et al., 2009). L'un des points essentiels dans cette interaction reste, selon les auteurs, la visibilité des actions des autres utilisateurs et par conséquent, bien souvent, la compréhension du but de l'action gestuelle et de son anticipation (Fiebrink et Morris, 2009). Néanmoins, certaines limitations restent inhérentes à la spatialité : certaines études ont montré en effet une certaine crainte de la part de quelques sujets d'entrer en collision physique avec les autres ou celle d'empiéter sur le territoire du voisin. La difficulté à atteindre des objets hors de portée a également été évoquée si l'espace est trop grand (Fiebrink et Morris, 2009). En résumé, malgré ces quelques inconvénients, les interfaces tangibles redonnent une place significative à la manipulation directe et exploitent la dextérité acquise par les êtres humains au sein de leur environnement quotidien (Couture et al., 2007). La capacité de laisser les sujets librement interagir avec des objets en les touchant et en les déplaçant de façon continue constitue le cœur même de cette interaction particulière. L'interface améliore l'action à plusieurs en permettant une meilleure coordination gestuelle des actions, une meilleure perception de l'espace et des changements de point de vue par les déplacements possibles autour de la table.

Comment évaluer une interface tangible ?

Dans ces interfaces les objets tangibles ne sont pas perçus en tant que tels mais seulement à travers les fonctions qu'ils assument par leurs positions ou leurs déplacements. Ainsi le principe d'affordance de Gibson (Gibson, 1986) n'est plus respecté (par exemple un crayon posé sur la table peut servir d'interrupteur pour une lampe) car pour l'utilisateur un objet qui est perçu par son apparence physique et sensorielle (poids, forme, bruit, etc.) n'est plus en relation avec sa fonction dans le monde physique puisqu'il peut en acquérir une autre, totalement arbitraire, dans le monde numérique. De plus les objets peuvent changer de fonction au gré des besoins ou de la fantaisie de l'utilisateur. Ainsi, une bonne traçabilité de l'utilisation de tels objets, sera nécessaire pour avoir un retour sur les actions effectuées par ces objets et qu'elles soient compréhensibles.

Ainsi les systèmes interactifs que nous souhaitons réaliser, ne se démarquent pas seulement par le canal interactif, canal tangible plutôt que graphique, mais ils se démarquent aussi par la nature des associations liant les objets aux fonctions qu'ils remplissent à travers les actions qu'ils effectuent, nature qu'il faut prendre en compte dans la maintenance des connaissances du système interactif au-delà d'une représentation de ce qui se passe à l'instant actuel, dans le monde où opèrent les utilisateurs avec leurs objets.

Les systèmes interactifs de ce type entrent dans la catégorie dite « d'initiative mixte » évoquée par Hearst et al. (Hearst et al., 1999) : d'une part, les messages adressés par l'utilisateur à l'application, ne sont pas seulement des commandes, ce peuvent être aussi des informations sur le monde et les objets physiques qui s'y trouvent étant donné que la machine ne les comprend pas. L'application peut alors construire une représentation de la situation, de l'activité, ou des habitudes/habilités (profil) de l'utilisateur ou encore donner à voir cette activité à quelqu'un (pour apprendre, corriger ou comprendre cette activité), d'autre part, les messages adressés par l'application à l'utilisateur, ne sont pas uniquement des informations concernant l'état de l'application mais également des informations concernant l'activité de l'utilisateur à travers les objets qu'il manipule.

Affordance

Gibson a introduit le concept d'affordance en 1979 et en a fait un pilier théorique de l'approche écologique. L'affordance est alors initialement ce que l'objet permet à l'individu de faire dans une situation, tel que le sujet le perçoit, c'est donc la perception par un individu d'un objet et les actions possibles que cet objet propose. Cette notion a fait l'objet ensuite de nombreuses appropriations par différents auteurs, particulièrement par Norman. L'affordance selon Norman correspond à une information nécessaire dans le monde pour agir de manière adéquate selon le projet et les objectifs de l'acteur considéré - l'apparence des dispositifs doit ainsi pouvoir fournir des indices pertinents pour une utilisation appropriée grâce à leurs affordances, « perçue » d'une part et « réelle » d'autre part (Norman, 1999). Mucchieli (2000) emploiera le terme de « porteurs de proposition d'interaction » pour faire référence aux objets affordants qui ont la propriété de proposer une certaine plausibilité de leurs fonctions. Allaire (2006) ira plus loin en parlant de « convivialité » afin de dénommer l'objet qui rend visible son utilité dans son contexte et qui amène l'individu à agir. C'est dans cette optique qu'il semble important que les objets des interfaces tangibles présentent une affordance de leur fonction numérique. En effet, avec ce type de technologie, les objets tangibles ne sont perçus qu'à travers leurs fonctions assignées, le principe d'affordance est alors oublié ; comment un cube posé sur une table musicale pourrait-il acquérir ainsi le rôle de son ou de rythme ?

L'affordance est une relation qui s'établit entre l'individu et les objets de l'environnement à travers leurs propriétés mais également en fonction de la tâche à effectuer et aussi en fonction des actions que les autres font avec ces objets, dans une triple dimension : objet, tâche, interaction collective. Ce

critère d'affordance semble le plus important pour évaluer l'utilisabilité d'une interface tangible, ce que nous faisons ci-après.

Expérimentation

Une expérimentation a été réalisée en laboratoire (Becker, 2010) pour mesurer l'affordance des objets en situation de travail avec la table interactive TangiSense. Les sujets étaient seuls et devaient réaliser une tâche avec des objets plus ou moins affordants mais qu'ils ne connaissaient pas (situation dite directe) ou devaient réaliser ces mêmes tâches avec d'autres personnes qui connaissaient les objets et les manipulaient (situation dite indirecte).

Les hypothèses théoriques sont :

- - H1 - Des différences de compréhension existent entre des objets affordants ou non affordants, indépendamment de la situation et des acteurs (en d'autres termes l'affordance dépend essentiellement de la nature des objets),
- - H2 - La situation d'interaction d'un objet influe sur sa compréhension et la construction de l'affordance, notamment par la présence d'autres acteurs,
- - H3 - La mono ou multifonctionnalité d'un objet influe sur sa compréhension et la construction de l'affordance (la multifonctionnalité d'un objet s'entend par le fait qu'il a une affordance propre et une affordance héritée de ses capacités numériques augmentées – un verre étiqueté et interactif auquel on donne une tout autre fonction sert encore à boire si l'on a soif).

Les hypothèses opérationnelles sont que ces différences sont mesurables en termes de temps de compréhension (dès l'instant où les objets sont perçus par l'utilisateur jusqu'à ce qu'il décrive ses fonctions) et de facilité de compréhension (nombre d'erreurs dans l'évaluation subjective de la tâche).

A ces hypothèses principales s'en ajoutent d'autres, dans la mesure où dans une IHM (Interface Homme-Machine) on distingue généralement entre plusieurs types d'objets : (a) les objets de l'interface (menus déroulants, ascenseurs, etc.) communs à toutes les applications et (b) les objets de l'application (icônes, objets fonctionnels, formulaires, etc.) propres à l'application.

Ainsi on s'attend à ce que :

- - H'1 - A degré d'affordance égale, les objets de l'interface seront compris beaucoup plus facilement et plus rapidement que les

objets d'une application, du fait de leur valeur « culturelle » plus grande (en effet les personnes ont acquis cette culture des objets de l'interface depuis le développement récent et l'utilisation fréquente des IHM graphiques),

- - H'2 - Les objets de l'interface les plus abordables seront les plus transportables dans d'autres applications que les objets non abordables de l'interface (à condition de garder leur fonction), mais inversement ils seront moins interchangeables en termes de fonctionnalité,
- - H'3 - Les objets les moins abordables de l'application (donc les moins porteurs de sens) seront d'une part les plus polyvalents et d'autre part les plus personnalisables et appropriables par un individu.

Contexte applicatif

Plusieurs applications ont été programmées pour la table. Outre une simulation pour le trafic routier décrite au début de l'ouvrage, deux applications ont été orientées vers la production musicale : (a) Music Automaton : il s'agit d'une activité permettant d'interagir avec des instruments (tambourin, batterie, klaxon, etc.). Pour cela suffit au préalable de poser sur la table un personnage correspondant à un rythme particulier, lorsqu'il est posé, des leds vont s'allumer sur la table. Lorsqu'un instrument est posé au même moment que la led s'illumine alors on entend le son correspondant : tambourin, batterie ou autre. Dans cette application, le rythme a été programmé en faisant référence au jeu de la vie de Gardner et métaphoriquement aux lois génétiques des cellules (Une led = une cellule). La programmation a ainsi été faite en simulant la vie des cellules. (b) CD Jukebox : ici le principe est similaire au précédent, la différence est qu'il ne s'agit plus d'instruments mais de textures sonores. L'application consiste à déposer un CD audio sur la table et on peut alors en extraire différentes textures sonores puis on peut récupérer ces dernières grâce à des petits cubes transparents et les rejouer à volonté. Comme indiqué précédemment il faut au préalable déposer un personnage pour le rythme afin que les leds s'allument et que le son soit joué en conséquence.

Protocole expérimental

Le design des objets a été fait en séances de conception participative avec des musiciens, des designers et des gens tout venant. Ils avaient pour consigne de dessiner des objets les plus abordables possibles pour les applications de musique consistant à manipuler des extraits musicaux comme augmenter ou diminuer le tempo, arrêter ou démarrer un enregistrement, changer la tonalité,

etc. (la fig. 12 donne un exemple de résultat obtenu). Leurs résultats étaient validés par l'ensemble des acteurs. On a ainsi obtenu des objets déclarés affordants par certains, dont il s'agissait d'évaluer *a posteriori* leur réelle affordance sur les autres. L'exemple ci-dessous est particulièrement parlant dans les trois cas où :

- Un cœur peut symboliser tout sauf peut-être l'idée de rythme,
- Une main tendue peut évoquer un geste d'un policier pour arrêter une voiture mais pas un morceau de musique,
- Une note posée sur une table est sans signification particulière et ne peut évoquer un changement de tonalité si on ne le sait pas sans l'avoir expérimenté.

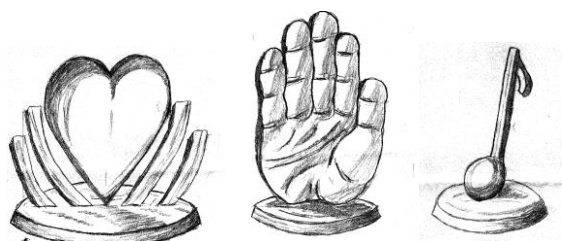


Figure 12 : Objet «rythme» (en forme de cœur), objet «arrêt» (en forme de main) et objet «note».

Nous ne décrivons pas plus en détail ces séances de conception qui ont conduit à réaliser en dur les objets correspondants qui ont été utilisés dans la suite de l'expérience. Nous avons pris 16 sujets répartis chaque fois en 2 groupes opposés pour tester chaque hypothèse ; par exemple pour H1 la tâche était de comprendre la fonction des objets dans diverses situations, pour les uns les objets étaient choisis parmi les plus affordants pour les autres parmi les moins affordants. Et ainsi de suite pour H2, H3, H'1 et H'2. Les mesures de temps de compréhension et du nombre d'erreurs ont été faites, complétées par des entretiens en fin de séance à l'aide d'un questionnaire utilisant des échelles de Lickert.

Résultats

Nous présentons un tableau de résultats dans la figure 13.

| Résultats en fonction de la situation | Situation directe | | Situation indirecte | |
|---------------------------------------|-------------------|----------------|---------------------|----------------|
| | Objet aff. | Objet non aff. | Objet aff. | Objet non aff. |
| Difficulté de la tâche (Lickert) | 1, 0 | 1, 0 | 1, 0 | 3, 0.925 |

| | | | | |
|--|------------|------------|------------|------------|
| 1-6) | | | | |
| Difficulté de compréhension (Lickert 1-6) | 2, 0.5 | 3.5, 1.58 | 3.25, 1.6 | 3, 0.925 |
| Temps de compréhension | 10.5, 4.3 | 35.8, 24.2 | 36.3, 9.3 | 23.5, 11.4 |
| Nombre d'erreurs avant validation | 0.125, 0.3 | 1.1, 0.4 | 0.375, 0.5 | 0.6, 0.5 |
| Nombre d'erreurs | 0.125, 0.3 | 0.375, 0.5 | 0.25, 0.4 | 0.6, 0.5 |
| Estimation subjective de l'affordance sur une échelle de Lickert | 1.6, 0.3 | 5.5, 0.2 | 5.5, 0.1 | 6, 0 |

Fig. 13 : résultats de mesures et résultats des questionnaires. Les valeurs indiquées dans chaque cellule sont la moyenne et l'écart-type pour tous les sujets ayant passé le test.

Sur ce tableau on peut lire qu'en situation directe les objets les plus affordants sont les plus pertinents pour la tâche (comparaison colonnes 1 et 2), H1 est vérifiée mais elle est contredite pour la situation indirecte (comparaison colonnes 3 et 4). Par ailleurs, pour un objet affordant la situation directe est plus favorable à la compréhension (comparaison colonnes 1 et 3) et moins favorable pour la situation indirecte (comparaison colonnes 2 et 4). H2 est vérifiée. Tout se passe donc comme s'il y avait une affordance « pour soi » (égocentrée) et une affordance « pour les autres » (exocentrée). Une analyse plus fine montre que d'autres indices que l'apparence permettent de décoder les fonctions des objets non affordants (indices sonores, effets de leurs actions dans la tâche, inférences socio-culturelles). En corollaire l'analyse montre aussi que H3 est vérifiée, plus précisément, si un objet est multifonctionnel, il sera plus difficile à comprendre mais en même temps plus riche pour l'interaction.

La figure 14 montre d'autres aspects de l'affordance par rapport au type d'objets (objet de l'application / objet de l'interface)

| Résultats en fonction du type d'objet | Objet application | | Objet interface | |
|---------------------------------------|-------------------|----------------|-----------------|----------------|
| | Objet aff. | Objet non aff. | Objet aff. | Objet non aff. |
| | | | | |

| | | | | |
|--|------------|------------|------------|------------|
| Difficulté de la tâche (Lickert 1-6) | 1.75, 0.4 | 2.125, 0.8 | 1, 0 | 3, 0.925 |
| Difficulté de compréhension (Lickert 1-6) | 3, 1.8 | 3.5, 2 | 2, 0.8 | 3, 0.925 |
| Pertinence à réutiliser la fonction dans un autre contexte | 2.75, 2 | 3.875, 1.4 | 1.75, 0.8 | 1.8, 1.4 |
| Pertinence à réutiliser l'objet dans un autre contexte | 2.625, 1.9 | 4, 2 | 6.75, 0.4 | 3.25, 1.4 |
| Temps de compréhension | 70.6, 37.9 | 58, 32.3 | 10.5, 9.3 | 23.5, 11.4 |
| Nombre d'erreurs avant validation | 0.5, 0.5 | 0.75, 1 | 0.375, 0.5 | 0.6, 0.5 |
| Nombre d'erreurs | 0, 0 | 0.125, 0.3 | 0.25, 0.4 | 0.6, 0.5 |
| Estimation subjective de l'affordance sur une échelle de Lickert | 2.1, 0.8 | 6.5, 0.5 | 1.6, 0.3 | 5.5, 0.2 |

Fig. 14 : résultats de mesures et résultats des questionnaires. Les valeurs indiquées dans chaque cellule sont la moyenne et l'écart-type pour tous les sujets ayant passé le test.

Une lecture détaillée de ce tableau montre que les hypothèses H'1 à H'3 sont vérifiées.

Discussion

Les résultats précédents doivent être tempérés par des précautions d'usages habituels :

- l'étude est circonscrite à un type de table particulière et à des applications spécifiques,
- le nombre de sujets de l'expérience est petit et ne recouvre pas toutes les catégories socio-culturelles,
- les conditions ne sont pas entièrement écologiques.

Malgré ces restrictions des tendances fortes se dégagent, dues aux particularités de ces objets : d'une part la multifonctionnalité apparaît dans ces objets, qui est plus difficile à appréhender et à comprendre pour les sujets, d'autre part la question de la «culture technologique» fait naître d'autres formes d'affordance. Enfin le travail collectif semble favoriser le transfert de connaissances et la co-construction de sens à travers une certaine affordance que nous avons appelée exocentrée.

L'affordance d'un objet améliore la compréhension égocentrée de la tâche mais elle n'est pas seule en cause, il y a aussi et assez fortement la situation collective de travail – c'est-à-dire ce que les autres font aussi avec ces objets. Le travail collectif améliore la compréhension des objets non affordants dans la tâche. D'un autre côté l'affordance prend d'autres colorations pour les objets technologiques « augmentés » des interfaces tangibles : l'aspect multifonctionnel pour une part rend ces objets plus difficiles à comprendre mais en même temps plus faciles à « transporter » dans d'autres applications en conservant leur héritage fonctionnel.

Des questions socio-culturelles sont ainsi levées qui lient l'affordance à la réutilisation et à l'appropriation des objets : pour faire court, plus une fonction est « cachée » plus elle m'est « personnelle » ce qui permet dans certains cas de garder une certaine confidentialité dans ses interactions et de préserver un espace personnel ainsi que des savoir-faire privés.

Domaines d'application

La médiation tangible, le grand retour de l'intuitif

Ce paragraphe précise quelques domaines d'application dans lesquelles les interfaces tangibles peuvent être intéressantes à partir des résultats d'usage et des avantages ergonomiques attestés ci-dessus.

Cacher « l'informatique »

On savait déjà depuis longtemps faire semblant de cacher l'informatique dans les bornes interactives au moyen des écrans tactiles remplaçant le clavier et la souris. Mais à cause de la présence d'un écran sur lequel il s'agit de poser son doigt connote immédiatement la borne interactive comme un objet apparenté à de l'informatique.

Au contraire, les dalles Tangisense peuvent être complètement cachées dans une surface d'interaction autre qu'un écran comme une carte, une maquette, un aquarium, etc...), et les badges RFID peuvent être inclus dans les objets pour devenir totalement invisibles. Par exemple, prendre un petit personnage

et le poser quelque part sur une maquette pour voir entendre des voix ou éclairer un objet dans une vitrine ne présume absolument pas à priori de la présence d'un ordinateur.

Créer l'affordance

L'affordance est la capacité d'un objet à présenter une signification évidente et donc à induire immédiatement les actions que l'on peut exécuter en l'utilisant. C'est aller à contre-courant de l'adage populaire "*cet objet nous laisse comme une poule qui à trouvé un cure-dent*".

Cette faculté repositionne la démarche de conception de la médiation en scénographie en posant d'emblée que chaque objet doit être conçu de telle manière qu'il induise immédiatement les interactions possibles qu'il permet. Par exemple, une loupe va susciter naturellement l'envie de l'utiliser pour trouver quelque chose dans une carte, et ainsi déclencher par le badge qu'elle porte la diffusion de l'information cachée.

Personnaliser l'interaction

Parce que les objets sont porteurs d'un badge, il est possible de leur associer le profil contenu dans le ticket du visiteur d'un musée, lui aussi badgé, et induire un comportement personnalisé de la scénographie. Cela permet également au musée d'envisager de vendre des objets "*fétiches*" à l'accueil, qui seront utilisés pour interagir, collecter et personnaliser le parcours du visiteur dans l'exposition. Par exemple, un musée partenaire a utilisé une Baguette Magique badgée comme outil d'interaction dans sa scénographie.

Introduire une interaction évolutive

La présence de badges RFID va offrir au visiteur la possibilité que ses interactions en cours puissent tenir compte de ses actions précédentes dans le parcours muséographique. Par exemple, si vous visitez un site de fouilles romaines, on ne vous réexpliquera pas ce que c'est que de la "céramique sigillée" si vous avez consulté la borne générique située à l'entrée du site. Le classique lien hypertexte sous le l'expression "céramique sigillée" devient inutile pour le visiteur attentif.

Susciter les échanges entre utilisateurs

Lorsque la matrice Tangisense est organisée sous forme de table, et qu'un scénario implique plusieurs utilisateurs, il s'établit naturellement une concurrence ou une connivence ludique entre participants. Ce comportement, qui



a été vérifié également avec des tables tactiles, vient du fait que les participants partagent le même espace enrichi.

Inverser la place de l'animateur

La tangibilité et l'affordance remettent en question le déroulement traditionnel du discours de l'animateur dans le musée et les structures de médiation de l'environnement. Précédemment, l'animateur était censé introduire avec plus ou moins de détails les règles du jeu et les connaissances nécessaires pour comprendre la scénographie exposée. Avec Tangisense, l'animateur n'explique quasiment plus rien au début du jeu, et les visiteurs auront tout de suite envie de "*passer à l'action*". L'animateur interviendra ensuite pour commenter et enrichir les informations et les situations que les visiteurs auront créés eux-mêmes sur la table. Le message sera mieux reçu car il sera délivré en contexte et en réponse à une question formulée. La conception de la scénographie et la formation des personnels du musée devront tenir compte de cette *inversion dans la démarche traditionnelle de médiation*.

Ouvrir le champ de l'interaction gestuelle

Tangisense a ouvert le champ des recherches sur lequel a travaillé l'équipe Multicom, celui de l'interaction par geste. Citons quelques exemples de gestes pour lesquels des maquettes fonctionnent déjà au laboratoire :

- Effacer en frottant avec une éponge,
- Monter l'intensité lumineuse en décrivant une ligne droite,
- Augmenter le son en tournant un objet bouton,
- Modifier le comportement d'un objet en approchant un autre,
- Etc.

La Biodiversité au bout des doigts

Le Parc Naturel Régional du Vercors (PNRV) et le CPIE Vercors sont devenus très tôt des collaborateurs fidèles du projet Tangisense. Le CPIE Vercors a pour mission d'informer et de former les différents publics à la connaissance du patrimoine naturel et culturel en vue de sa protection et de sa prise en compte dans les politiques d'aménagement et de développement local.

Le PNRV et le CPIE nous ont fait part de leur difficulté à motiver les publics scolaires lors de séances théoriques d'initiation à l'environnement. Lors de ces séances, des fiches papier étaient distribuées aux élèves et les animateurs les faisaient participer en posant des questions, en les invitant à répondre à des Quiz. Le bilan de ces séances n'était pas très positif.

En s'appuyant sur l'interaction tangible et l'inversion de la place de l'animateur, le CPIE et le PNRV se sont rendus rapidement compte de l'engagement très actif des élèves.

Déroulement du jeu

Dans cette application, les élèves sont regroupés en trois équipes de 2 ou 3 sur les trois côtés d'une table Tangisense de 50 pouces face à un écran vertical numérique de même taille disposé sur le quatrième côté de la table. Des figurines d'animaux sont disposées autour de la table. Le discours d'introduction de l'animateur se limite à deux phrases :

"Vous êtes face à une carte des hauts plateaux du Vercors, et vous imaginez bien que les animaux ici présents ne vivent pas n'importe où. Les trois équipes doivent placer à tour de rôle les animaux sur la case d'information face à eux, puis ensuite sur la carte pour faire le meilleur score possible"

Lorsque qu'un animal est posé sur la carte, un cercle de couleur apparaît ou bien une croix. L'animateur n'intervient que lors de questions posées par les joueurs ou lors de situations propices à leurs interrogations, comme:

- La loupe sert à trouver des informations sur le territoire,
- Les joueurs s'approprient les animaux sur la case d'information avec une couleur correspondant à leur score,
- La notion de Biotope quand un cercle ou une croix rouge apparaît sous l'animal,
- La notion de chaîne alimentaire quand un pointillé animé relie deux animaux.

L'application Biodiversité a été déployée des dizaines de fois, sur le Parc du Vercors, lors la Fête de la Science à Grenoble, et au Salon de l'Agriculture à Paris. Des scolaires et des adultes ont joué de nombreuses parties. L'engagement des joueurs est total pour une partie d'une vingtaine de minutes.



L'arbre qui ne cache plus la forêt

Dans le cadre d'une convention de collaboration avec l'Université, l'Irstea (Ex Cemagref) et le CPIE Vercors, il a été décidé de développer un logiciel permettant d'utiliser la table « Tangisense » comme outil de médiation à destination du grand public.

L'Irstea et le CPIE Vercors ont conçu le scénario du jeu et fourni les contenus textuels et les images.

Le cahier des charges de l'application stipulait qu'il fallait utiliser la table Tangisense de 50 pouces et développer un logiciel de jeu impliquant 3 protagonistes (ici, des spécialistes de la forêt, des médiateurs de l'environnement, des élus, tout public, etc...) en appliquant les principes suivants :

- Faciliter à l'extrême la prise en main du jeu pour l'animateur,
- Renverser le paradigme habituel de présentation d'un jeu au public consistant à expliquer les règles puis à proposer de jouer, par une démarche du "faire" d'abord pour "apprendre" ensuite.

L'objectif du jeu est de comprendre quels sont les liens entre la forêt et ses acteurs et qu'il est nécessaire de concilier les différentes activités de l'homme pour maintenir un équilibre dans l'utilisation de la ressource naturelle.

Trois équipes sont constituées:

- **Exploitant forestier**, « Comment puis-je développer l'économie de mon territoire sans le surexploiter ? »,
- **Touriste**, « Ma forêt est un espace d'accueil, que suis-je autorisé à faire ? »,
- **Défenseur de l'environnement**, « La forêt est un milieu dit naturel, comment participer à l'amélioration des sites ? »

Le résultat de la négociation de ces acteurs est un équilibre délicat symbolisé à l'écran par un triangle mobile qui tourne suspendu par son centre. Chacune des extrémités porte l'enjeu de chaque équipe. Le but des équipes est de faire grossir le poids de leur activité pour gagner des points, mais ce qui fera basculer la pointe du mobile en leur défaveur. Les autres équipes devront développer leur activité pour rétablir l'équilibre. L'objectif de la médiation est bien de faire passer le message: "Développer une activité dans votre intérêt en maintenant un équilibre sans détruire l'environnement".



Les joueurs disposent de silhouettes d'arbres à l'effigie de leur activité, cachant chacun un type d'activité les concernant à développer sur le territoire, et pas n'importe où ! Par exemple :

- Le Forestier pourra couper du bois pour le vendre, ou bien développer des granulés de chauffage pour les habitants du territoire
- Le Touriste pourra faire des randonnées ou bien du 4x4
- Le défenseur de l'environnement pour baliser des chemins ou favoriser le maintien d'arbres morts pour développer la micro faune.

Cette application a été mise en service et est utilisée dans des campagnes de sensibilisation du grand public.

SoundSorting

Utilisation de Tangisense pour trier des sons avec des objets.

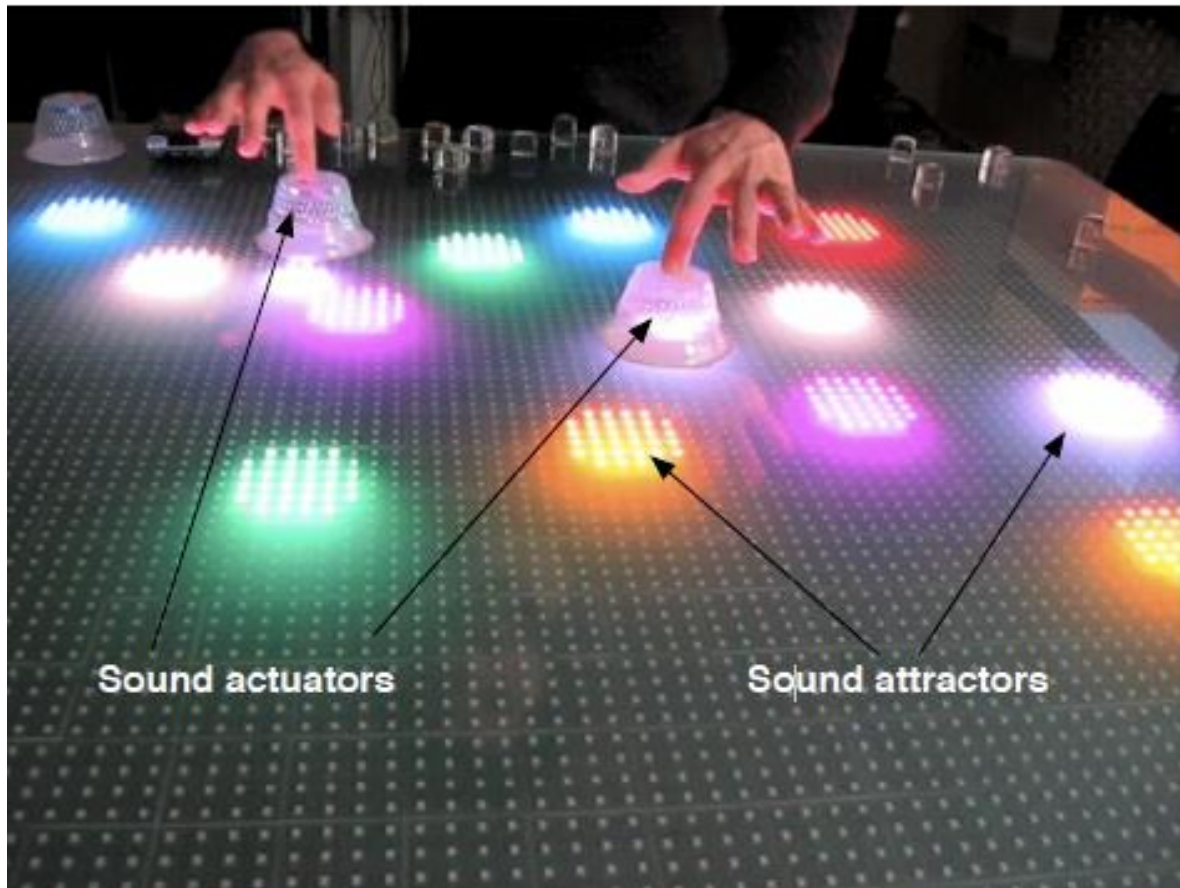
Voici un exemple de choix d'objets arbitraires pour représenter une collection de sons. Lorsqu'un CDrom porteur d'un badge est déposé sur la table, un extrait des sons qu'il contient est immédiatement diffusé sur l'ordinateur qui pilote Tangisense. Une enceinte acoustique miniature posée au centre de la table sert autoriser le déclenchement du son, et à régler le volume en la faisant pivoter sur elle-même. Les sons sont "sélectionnés" par un cube de verre parmi une liste de choix de titre affichés à proximité du CDrom sur la table. Ensuite, en faisant glisser le cube de verre en direction de l'enceinte, il est possible de mixer ce son avec les autres en réglant son volume par la distance à l'enceinte. Les objets de manipulation sont des objets de bureau quelconques.



Le scénario utilisé dans le domaine sonore est d'affecter à 16 cubes des **textures sonores** différentes choisies pour cette expérience. Un objet "haut-parleur" définit une zone d'écoute sur la table, et quatre zones lumineuses (les paniers) apparaissent autour d'objets ronds qui les représentent d'une manière tangible. Lorsqu'un utilisateur a fait son choix, une matrice de similarité (même panier ou non) est créée et est sommée à celle des autres utilisateurs. Cela définit une matrice de corrélation, et à partir de là une analyse factorielle permet de créer un espace 2D qui représente la meilleure solution pour l'ensemble des utilisateurs.



Une fois cette carte « géographique » de textures sonores construite on peut effectuer une navigation dans cet espace. On dispose de plusieurs objets tangibles (figure suivante) et les petits cubes servent à constituer la carte géographique si l'on désire la faire soi-même. Ils laissent une trace visible sur la table et peuvent être retirés ensuite. Des objets navigateurs permettent alors de faire un mixage interactif de ces textures. Le poids des différents sons est fonction décroissant de leur distance aux points de la carte répertoriés. On a choisi pour cette fonction des objets dotés de 5 étiquettes qui permettent de mesurer non seulement les coordonnées, mais aussi la rotation. Cette rotation donne à l'utilisateur un paramètre supplémentaire pour la modification du résultat sonore.



Dans cette démonstration, les deux parties montrent à la fois les spécificités de la tangibilité et de l'affordance des objets avec des actions ou fonctions. Outre l'usage qui peut être fait en création sonore, elles sont transposables dans toute expérience de tri (par exemple d'images, de post it). La navigation quant à elle est une métaphore qui peut s'appliquer aux espaces architecturaux ou routiers.

Jeu du RISK

La particularité de ce jeu est de se jouer en réseau sur Internet, en connectant deux tables Tangisense. Le protocole réseau TCP/IP est utilisé pour faire communiquer les applications développées en technologie Multi-agents. Le jeu comprend des Tangigets de Coordination (gérer les états du jeu), des Dés (simuler un vrai jet de dé pour les attaques), un Brouillon (se mettre en stand-by), des Pions (une armée), et un Avatar (identifie le joueur sur une table).

Chaque joueur se trouve sur une table interactive. Pour rejoindre une partie, les joueurs doivent déposer leur carte d'identification sur la table pour valider leur demande. Ce processus consiste à allouer au joueur une couleur et ses pays. La couleur lui est indiquée en faisant apparaître sous sa carte une zone lumineuse de la bonne couleur. Quant aux pays, ils clignoteront jusqu'à ce que le joueur dépose au moins un pion sur les pays concernés (dans le cas où

sa demande n'aboutit pas, un retour visuel sous la forme d'une croix rouge apparaîtra sous sa carte).

Le joueur passe en phase d'initialisation en posant sur la table son objet de coordination sur la facette I, il peut alors déployer ses armées. Lorsqu'une armée est bien positionnée, un retour visuel sous la forme d'une zone de la couleur du joueur apparaît. Pour signaler la fin de la phase d'initialisation, le joueur positionne son objet de coordination sur la facette T. Le joueur distant est alors informé que ce joueur est prêt. Pour débiter les phases de combat, tous les joueurs doivent avoir terminé leur phase d'initialisation.

L'application détermine aléatoirement le premier joueur qui doit attaquer à l'aide d'un retour visuel sous le Tangiget de coordination. Le joueur positionne son Tangiget de coordination sur la facette A et déplace ses armées sur le pays attaqué. Le joueur distant est alors informé de l'intention d'attaque et doit positionner son Tangiget de coordination sur la facette défense (marquée D). Après avoir terminé le déplacement de ses armées et que le joueur attaqué soit en phase de défense, le joueur attaquant lance le processus de bataille qui consiste à déterminer le gagnant et le perdant avec la perte des armées. Les deux joueurs doivent supprimer les armées perdues et positionner leur Tangiget de coordination sur la facette marquée T.

Le joueur suivant peut alors commencer sa phase d'attaque étant informé par le système de son tour avec un retour visuel sous le Tangiget de coordination comme précédemment.

Cette application a permis de valider les concepts de coordination entre tables à l'aide de modèles d'agents.

Maquettes de laboratoire

Un certain nombre de maquettes de laboratoire ont été développées autour du concept d'interaction tangible. Certaines sont de simples "midnight projects" développées par des chercheurs passionnés, d'autres ont été intégrées comme outils dans des expériences sur la plateforme expérimentale dédiée aux usages.

PongDemo

La table Tangisense est divisée en deux zones, comme une table de ping-pong. Une balle virtuelle est renvoyée par n'importe quel objet badgé manipulé par le joueur comme une raquette. Bien sûr, le jeu affiche le score de chaque joueur.

TangramDemo

Le Tangram est une sorte de puzzle chinois qui se compose en sept pièces qui peuvent se juxtaposer pour former un grand carré. Le but du jeu est d'utiliser ces pièces pour former d'autres formes créatives, comme une maison, un personnage, etc... Une réplique du Tangram a été réalisée avec des formes géométriques en bois équipées de badges, et une application de jeu développées sur Tangisense.

Un travail de recherche et une publication sur les usages effectués au laboratoire a montré que les sujets d'expérience vont deux fois plus vite en manipulant des formes physiques badgées qu'en utilisant des icônes sur l'écran. L'outil table Tangisense a permis d'enregistrer tous les mouvements des joueurs et de calculer des statistiques sur leurs performances.

BasketTest

Cette interface pouvant être utilisée dans une application plus grande dédiée aux activités de travail collaboratif permet de détecter les objets dans un papier.

Elle met en évidence la possibilité de détecter des objets badgés posés dans des paniers eux-mêmes badgés pour calculer automatiquement des regroupements ou des scores de choix.

Cette application met en évidence les capacités de la RFID de voir des objets à travers une surface non métallique.

Interfaces tangibles particulières

RadialDemo, un exemple d'interface avec un bouton Rotatif comportant plusieurs badges. Cet outil a été utilisé sur la plateforme expérimentale pour régler l'ambiance lumineuse lors d'expérience sur la domotique.

CollisionAvoidanceDemo, une interface permettant de détecter le voisinage d'un badge.

Simulation de cas d'usage

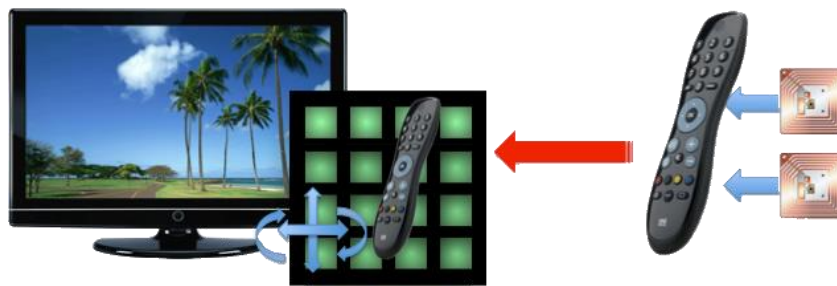
TangiPad

Ce projet mené par des étudiants est une anticipation de l'usage d'une seule dalle Tangisense pour piloter des équipements domotiques par des gestes exécutés au moyen d'objets familiers de la vie courante. Le concept de départ posait les principes suivants :

- Réduire drastiquement la complexité du pilotage des équipements électronique et domotiques,

- Faire converger les commandes de pilotage vers un ensemble réduit d'actions tangibles,
- Utiliser les objets familiers pour effectuer ces actions (téléphone, télécommandes TV, cartes à puces, portefeuille, etc.),
- Offrir à l'utilisateur la possibilité de créer lui-même un ensemble de commandes tangibles au moyen de gestes effectués sur une Dalle Tangisense.

Pour cela il suffit de coller deux badges RFID au dos de chacun des objets usuels et de les déclarer en les activant sur la Dalle Tangisense. Chacun des objets sera immédiatement reconnu par Tangisense et associé à l'appareil domotique ou électronique correspondant.



La Dalle Tangisense serait associée dans le même boîtier avec une passerelle traduisant les ordres tangibles en commandes Bluetooth vers des équipements tels la télévision, la chaîne HiFi, le téléphone, la centrale domotique pour les volets roulants, l'éclairage, le chauffage, etc...

Tangisense serait livré avec les gestes de base que sont :

- Aller vers le haut ou vers le bas
- Aller à gauche ou à droite
- Faire pivoter l'objet sur lui-même dans le sens horaire ou anti-horaire

Perspectives

Est-ce encore trop tôt ?

L'interaction tangible à base de RFID n'a pas connu le succès industriel et grand public que les partenaires des deux projets ANR espéraient. Peut-être arrivons nous trop tôt ?

Que l'on se souvienne de l'introduction des tablettes tactiles ! Il a fallu de nombreux échecs commerciaux, même pour Apple si attentif à l'ergonomie, et des innovations dans d'autres domaines comme l'intégration des composants, la baisse de la consommation électrique, la diminution du poids,

les réseaux en mobilité pour que la combinaison de ces facteurs fasse exploser le marché du Smartphone.

D'aucuns pensent qu'il existe un saut (un gap à franchir), pour passer du tactile au tangible, comme il a existé un saut pour passer du couple souris-clavier au tactile.

Enfin, les tables tactiles classiques actuelles peuvent être équipées de capteurs Tangisense en dessous de l'écran.

Et pourtant,

- Les expériences d'ergonomie en laboratoire ont montré l'efficacité de l'interaction tangible pour diminuer la charge cognitive par rapport au tactile
- Les expérimentations ont montré l'efficacité du travail collaboratif en mode négociation
- Les réalisations pour le Parc du Vercors, IRSTEA, et la Fête de la Science ont montré l'enthousiasme du public scolaire et prouvé l'efficacité de l'usage d'objets porteurs de sens et intuitifs, ainsi que la grande implication des adultes dans des scénarios de jeu éducatifs

Un environnement propice

Le développement du RFID dans de nombreux domaines représente autant de chances de voir apparaître un jour la nécessité d'une interaction tangible.

Norbert Schnell, de l'équipe « Interaction son-musique-mouvement » de l'IRCAM, joue de la musique avec son Smartphone.

Le développement des Objets Intelligents et connectés (IoT : Internet of Things) devrait redonner de l'intérêt pour l'interaction tangible (et pas uniquement par RFID). En effet, ces objets ont vocation, pour le grand public, à devenir familiers, simples d'usage et intuitifs.

Les Objets Intelligents emporteront des capteurs de toute sortes et disposeront de capacités d'interaction par gestes. Leur faible taille rendra les interfaces actuelles par boutons virtuels et écrans tactiles miniatures obsolètes en mobilité et pour les seniors. Le geste deviendra alors le mode d'interaction privilégié.

Pour aller plus loin, ils seront capables d'apprendre nos gestes pour les transformer en dialogue avec le numérique.

Conclusion

Les premières interfaces tangibles entrent progressivement sur le marché. Les concepts techniques et ergonomiques sont maintenant bien connus, ils ont été présentés ici autour de réalisations matérielles et logicielles dans un souci pédagogique. La technologie magnétique nous semble très porteuse car moins délicate et plus robuste que la solution optique.

Parmi les acquis signalons les avantages essentiels de ce type d'interface :

- Le paradigme d'interaction est plus proche d'une interaction naturaliste que dans tout autre type d'interface puisqu'on manipule des objets physiques comme les outils du monde quotidien,
- Le repérage spatial dans un monde 3D est facilité car la perspective géométrique est respectée,
- La multimodalité sensorielle est plus complète, le toucher notamment dépasse le tactile pour devenir haptique,
- La personnalisation des objets, fonctions, outils, etc... est possible,
- L'appropriation sensorielle et cognitive est meilleure,
- La mémorisation et l'apprentissage sont plus rapides.

Pour toutes ces raisons, nous ne doutons pas que les interfaces tangibles prendront leur juste place à côté des interfaces tactiles.

Bibliographie

1. Arfib D., Filatriau J.J., Kessous L. (2009). Prototyping Musical Experiments for Tangisense, a Tangible and Traceable Table. In Gouyon, F.; Barbosa, A.; Serra, X. 2009 (editors), Proceedings of SMC 2009, Porto, ISBN: 978-989-95577-6-5.
2. Allaire, S. (2006). Les affordances socio-numériques d'un environnement d'apprentissage hybride en soutien à des stagiaires en enseignement secondaire. De l'analyse réflexive à la co-élaboration de connaissances. Thèse de doctorat, Québec: Université Laval.
3. Becker, M. (2010). Le concept d'affordance et l'interface tangible Tangisense. Mémoire de master, université Paul Verlaine, Metz.
4. Benford, S., Schnadelbach, H., Koleva, B., Gaver, B., Schmidt, A., Boucher, A., Steed, A., Anastasi, R., Greenhalgh, C., Rodden, T. & Gellersen, H. (2003). Sensible, sensible and desirable: a framework for designing physical interface. Technical Report Equator-03-00, London: department of computer science, university college London.
5. Blackwell, A., Fitzmaurice, G., & Ishii, H. (2007). Tangible user interfaces in context and theory. CHI 2007, California, USA, May, ACM Press.
6. Caelen, J., Becker, M., and Pellegrin, A. (2011), Tangibility and Human-Computer interaction: an alternative approach to affordance. Proceedings of the IADIS conference on interfaces and Human-Computer Interaction (IADIS'2011), K. Blashki (ed). Roma, Italy July 2011, pp. 355-359.
7. Calvary, G., Coutaz, J., Thevenin, D., Limbourg, Q., Bouillon, L., Vanderdonck, J. (2003) A Unifying Reference Framework for Multi-Target User Interfaces. *Interacting with Computer* 15, (3) 289–308.
8. Coutaz, J. (1987) PAC, an implementation model for dialog design. In H.J. Bullinger, B. Shackel, eds., *Proceedings Interact'87 Conference*, North Holland, p. 431-436.
9. Couture, N., Rivière, G., & Libération, D. (2007). Table interactive et interface tangible pour les géosciences : retour d'expérience. *Computer human interaction*, 3, 1-4.
10. Couture N. Interaction Tangible, de l'incarnation physique des données vers l'interaction avec tout le corps. Interface homme-machine [cs.HC]. École doctorale de mathématiques et informatique, Université de Bordeaux, 2010.

11. Fiebrink, R., & Morris, M. R. (2009). Dynamic Mapping of Physical Controls for Tabletop. *Computer Human Interaction*, 471-480.
12. Fitzmaurice, G. W., & Buxton, W. (1997). An empirical evaluation of graspable user interfaces: towards specialized, space-multiplexed input. *Proceedings of CHI'97*, 43-50.
13. Fitzmaurice, G.W. (1996). *Graspable User Interfaces*. Ph.D. Thesis, University of Toronto.
14. Fitzmaurice, G.W., & Buxton, W. (1997). An empirical evaluation of graspable user interfaces: towards specialized, space-multiplexed input. *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems*, Atlanta, Georgia, USA, 43 – 50.
15. Fitzmaurice, G.W., Ishii, H., & Buxton, W. (1995). Bricks: laying the foundations for graspable user interfaces. *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems*, Denver, Colorado, 442-449.
16. Hornecker, E., & Buur, J. (2006). Getting a Grip on Tangible Interaction : A Framework on Physical Space and Social Interaction. *CHI 2006*, Québec, Canada, ACM Press.
17. Ishii, H., & Ullmer, B. (1997). Tangible Bits: Towards Seamless Interfaces Between People, Bits, and Atoms. *CHI 1997*, 234-41.
18. Ishii, H., Mazalek, A., & Lee, J. (2001). Bottles as a Minimal Interface to Access Digital Information. *Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, CHI 2001, Seattle, États-Unis d'Amérique, 31 mars - 4 avril 2001, ACM, New York.
19. Jorda S, Geiger G, Alonso M, Kaltenbrunner M. The reacTable: Exploring the Synergy between Live Music Performance and Tabletop Tangible Interfaces. In *TEI '07: Proceedings of the 1st international conference on Tangible and embedded interaction*, ACM Press (2007) pp. 139-146.
20. Kubicki, S., Lebrun, Y., Lepreux, S., Adam, E., Kolski, C., & Mandiau, R. (2009a). Exploitation de la technologie RFID associée à une Table interactive avec objets Tangibles et Traçables. Application à la gestion de trafic routier. *Génie logiciel*, 31, 41-45.
21. Kubicki S., Lepreux S., Kolski C., Perrot C., & Caelen J. (2009b). TangiSense : présentation d'une table interactive avec technologie RFID permettant la manipulation d'objets Tangibles et Traçables. *Proceedings of*

IHM 2009, 21ème Conférence de l'Association Francophone sur l'Interaction Homme-Machine (Grenoble, France, 13-16 octobre 2009), International Conference Proceedings Series, ACM Press, Grenoble, pp. 351-354.

22. Kubicki, S., Lepreux, S., Kolski, C., & Caelen, J. (2010). Towards New Human-Machine Systems in contexts involving interactive table and tangible objects. The 11th IFAC/IFIP/IFORS/IEA Symposium on Analysis, Design, and Evaluation of Human-Machine Systems, August 31 - September 3, Valenciennes, France.
23. Manches, A., Malley, C. O., & Benford, S. (2009). Physical Manipulation : Evaluating the Potential for Tangible Designs, 77-84. TEI Conference 2009, Cambridge, UK, feb.
24. Moggridge, B. (2006). Designing interactions. MIT university Press.
25. Mucchielli, A. (2000). L'art d'influencer. Paris : Ed. Armand Colin.
26. Schneiderman, B. (1983). Direct Manipulation: a Step Beyond Programming Languages. Computer, 16 (8), 57-69.