



**HAL**  
open science

# Interaction Tangible, de l'incarnation physique des données vers l'interaction avec tout le corps

Nadine Couture

► **To cite this version:**

Nadine Couture. 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. tel-01130032

**HAL Id: tel-01130032**

**<https://hal.science/tel-01130032>**

Submitted on 11 Mar 2015

**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.

N° d'ordre : 509

# HABILITATION A DIRIGER DES RECHERCHES

PRÉSENTÉE A

**L'UNIVERSITÉ BORDEAUX 1**

ÉCOLE DOCTORALE DE MATHÉMATIQUES ET INFORMATIQUE

Par Nadine ROUILLON COUTURE

---

**Interaction Tangible,  
de l'incarnation physique des données  
vers l'interaction avec tout le corps**

---

Soutenance le 14 Décembre 2010, devant le jury composé de

|               |   |   |
|---------------|---|---|
| Présidente :  | Maylis DELEST   | Professeure à l'Université de Bordeaux, France.   |
| Rapporteurs : | Joëlle COUTAZ<br>Laurent GRISONI<br>Jean VANDERDONCKT | Professeure à l'Université Joseph Fourier, Grenoble, France.<br>Professeur à l'Université de Lille, Polytech'Lille, France.<br>Professeur à l'Université Catholique de Louvain, Belgique. |
| Examineurs :  | Jean ESTERLE<br>Philip GRAY<br>Brygg ULLMER           | Professeur, Directeur de la Recherche de l'ESTIA, France.<br>Senior Lecturer à l'Université de Glasgow, Ecosse, UK.<br>Associated Professor à l'Université de l'Etat de Louisiane, USA.   |



*C'est parce qu'on imagine simultanément tous les pas qu'on devra faire qu'on se décourage,  
alors qu'il s'agit de les aligner un à un.*

*Marcel Jouhandeau  
(écrivain français, 1888-1979)*



## Note au lecteur

---

Mon dossier d'Habilitation à Diriger des Recherches se décompose en deux documents complémentaires.

- Ce mémoire présente mes apports au domaine de recherche de l'Interaction Tangible. Il débute par un préambule présentant mon parcours ainsi que la construction et la maturation du projet de recherche que nous menons.
- Ce mémoire est accompagné de mon rapport d'activités depuis le début de ma carrière : curriculum vitae, activités pédagogiques et de recherche, missions d'encadrement, d'évaluation, d'animation, projets menés, missions de conseils aux entreprises et enfin la liste de mes publications classées par catégories.



## Table des matières

|   |           |
|---|-----------|
| <b>NOTE AU LECTEUR.....</b>   | <b>5</b>  |
| <b>TABLE DES MATIERES.....</b>  | <b>7</b>  |
| <b>TABLE DES ILLUSTRATIONS.....</b>   | <b>9</b>  |
| <b>PREAMBULE.....</b>   | <b>11</b> |
| PARCOURS.....   | 11        |
| EVOLUTION DU PROJET DE RECHERCHE.....   | 11        |
| CADRE DES TRAVAUX.....  | 12        |
| <b>INTRODUCTION.....</b>  | <b>15</b> |
| QU'EST CE QUE L'INTERACTION TANGIBLE ? .....  | 15        |
| RELATIONS ENTRE L'INTERACTION TANGIBLE ET DES DISCIPLINES PROCHES.....                                      | 17        |
| <i>Interaction Tangible et IHM.....</i>   | 17        |
| <i>Interaction Tangible et Conception de Produits Industriels.....</i>                                      | 18        |
| <i>Interaction Tangible et Arts Interactifs.....</i>  | 20        |
| <i>Interaction Tangible et 3DUI.....</i>  | 22        |
| APPROCHE CENTREE UTILISATEURS POUR L'OPTIMISATION DES TACHES COMPLEXES .....                                | 23        |
| PLAN DU MEMOIRE .....   | 25        |
| <b>CHAPITRE 1. CADRE DE CONCEPTION DES INTERFACES TANGIBLES.....</b>  | <b>27</b> |
| 1.1. L'EXISTANT.....  | 27        |
| 1.1.1. <i>Les systèmes mixtes, la réalité augmentée et la virtualité augmentée.....</i>                     | 27        |
| 1.1.2. <i>Le modèle MCRit.....</i>  | 28        |
| 1.1.3. <i>Les propriétés des Interfaces Tangibles.....</i>  | 29        |
| 1.1.4. <i>Les boucles de rétroactions.....</i>  | 30        |
| 1.1.5. <i>Les catégorisations.....</i>  | 31        |
| 1.2. CONTRIBUTIONS.....   | 32        |
| 1.2.1. <i>Vers une méthode de conception des Interfaces Tangibles.....</i>                                  | 32        |
| 1.2.2. <i>Une méthode réutilisable basée sur des filtres pour définir les interacteurs pertinents.....</i>  | 34        |
| 1.2.3. <i>Des recommandations pour l'évaluation des interfaces tangibles.....</i>                           | 37        |
| 1.2.4. <i>La preuve de l'hypothèse de Fitzmaurice.....</i>  | 38        |
| 1.3. PERSPECTIVES POUR LE CADRE DE CONCEPTION DES INTERFACES TANGIBLES .....                                | 40        |
| 1.3.1. <i>Modèle MCRIT et boucles de rétroaction confrontés à l'Interaction Tangible à gros grains.....</i> | 40        |
| 1.3.2. <i>Core Tangible.....</i>  | 41        |
| <b>CHAPITRE 2. INTERFACES TANGIBLES POUR L'ASSEMBLAGE DE PIECES 3D VIRTUELLES.....</b>                      | <b>43</b> |
| 2.1. PROBLEMATIQUE .....  | 43        |
| 2.1.1. <i>Manipulation et degrés de libertés (DOF).....</i>   | 43        |
| 2.1.2. <i>Technique d'interaction.....</i>  | 43        |
| 2.2. CONTRIBUTIONS.....   | 44        |
| 2.2.1. <i>Mise en position relative en CFAO : ESKUA.....</i>  | 44        |
| 2.2.2. <i>Reconstruction de fragments archéologiques : ArcheoTUI.....</i>                                   | 47        |
| 2.2.3. <i>Activation de modalité pour l'assemblage de pièces virtuelles.....</i>                            | 49        |
| 2.3. PERSPECTIVES POUR L'ASSEMBLAGE TANGIBLE DE PIECES VIRTUELLES 3D.....                                   | 51        |
| 2.3.1. <i>Contexte : projet ANR SeARCH.....</i>   | 51        |
| 2.3.2. <i>Mise en position relative et collisions.....</i>  | 52        |
| <b>CHAPITRE 3. INTERACTION TANGIBLE MULTI-SURFACES.....</b>   | <b>55</b> |
| 3.1. CONTEXTE.....  | 55        |
| 3.2. CONTRIBUTIONS.....   | 55        |
| 3.2.1. <i>Validation d'hypothèses de modèle 3D de sous-sol par des coupes 2D : GeoTUI.....</i>              | 55        |
| 3.2.2. <i>Conception d'une Table Tangible favorisant l'acte d'achat : Tribal Tabletop.....</i>              | 58        |
| 3.2.3. <i>Amélioration de l'interaction directe entre concepteurs pour la revue de projets.....</i>         | 59        |
| 3.3. PERSPECTIVES POUR L'INTERACTION TANGIBLE MULTI-SURFACE .....   | 61        |
| 3.3.1. <i>GeoTUI 2.0.....</i>   | 61        |
| 3.3.2. <i>Intégration de l'interaction tangible et tactile.....</i>   | 61        |

|  |           |
|--|-----------|
| <b>CHAPITRE 4. INTERACTION TANGIBLE AVEC TOUT LE CORPS .....</b>                                 | <b>63</b> |
| 4.1. LE MOUVEMENT DU CORPS, LA CAPTURE DU GESTE .....  | 63        |
| 4.2. CONTRIBUTIONS .....   | 64        |
| 4.2.1. <i>Cadre de conception : une architecture logicielle unificatrice</i> .....               | 64        |
| 4.2.2. <i>Couplage avec l'Informatique Affective</i> .....                                       | 67        |
| 4.2.2.1. Système eMotion.....  | 67        |
| 4.2.2.2. Reconnaissance d'émotions : un point de vue interaction multimodale .....               | 69        |
| 4.2.3. <i>Augmentation d'un spectacle de danse, projet ANR CARE</i> .....                        | 72        |
| 4.2.4. <i>Mise en action d'une modalité de sortie (actuation) en situation de mobilité</i> ..... | 74        |
| 4.3. PERSPECTIVES POUR L'INTERACTION TANGIBLE A GROS GRAINS.....                                 | 77        |
| 4.3.1. <i>En informatique affective</i> .....  | 77        |
| 4.3.2. <i>Ballet Augmenté et Esquisse 3D (sketch-based modeling)</i> .....                       | 78        |
| <b>CONCLUSION .....</b>  | <b>81</b> |
| <b>BIBLIOGRAPHIE .....</b>   | <b>83</b> |

---

## Table des Illustrations

|   |    |
|---|----|
| Figure 1. Passive Props .....   | 17 |
| Figure 2. GraspDraw .....   | 18 |
| Figure 3. PinWheels .....   | 18 |
| Figure 4. ESKUA .....   | 19 |
| Figure 5. Marble Answering Machine .....  | 19 |
| Figure 6. Projet ANR CARE (2007-2001) .....   | 21 |
| Figure 7. Expérimentation du 20 Juin 2008 (A. Clay et G. Domenger) .....  | 21 |
| Figure 8. Premier casque de visualisation par Sutherland et Sproull (Harvard, 1967) .....   | 22 |
| Figure 9. Travaux en Interaction Tangible présentés dans ce document .....  | 25 |
| Figure 10. Modèles MVC et MCRit. (extrait de (Riviere 2009), reproduits et traduits de (Ullmer 2002)) .....   | 28 |
| Figure 11. Modèles GUI et TUI (extrait de (Riviere 2009), reproduite et traduite de (Ishii 2008)) .....   | 29 |
| Figure 12. Boucles de rétroaction des TUIs (extrait de (Riviere 2009), reproduit et traduit de (Ishii 2008)) .....  | 30 |
| Figure 13. Formes géométriques correspondantes à l'ensemble théorique d'interacteurs .....  | 35 |
| Figure 14. Jeu d'interacteur obtenu après les passages de filtres. ....   | 37 |
| Figure 15. Interacteurs issus des méthodes DFA (cf. paragraphe 1.2.2) en résine KUVVO 15040 peints .....  | 45 |
| Figure 16. La plate-forme ESKUA : rangée sous le moniteur (à gauche), dépliée lors de son utilisation (au centre) et la caméra repliée en vue du rangement de la plate-forme (à droite) ..... | 45 |
| Figure 17. Scénario d'utilisation d'ESKUA .....   | 46 |
| Figure 18. Assemblage chape sur vérin .....   | 47 |
| Figure 19. Photographie des fragments d'une fontaine. ....  | 47 |
| Figure 20. Les mêmes fragments numérisés, puis assemblés. ....  | 48 |
| Figure 21. L'Interface Tangible ArcheoTUI .....   | 48 |
| Figure 22. Solution avec boutons embarqués sur les interacteurs .....   | 51 |
| Figure 23. GeoTUI pendant une expérimentation à l'IFP Energie Nouvelle : trépied, caméra, pavé numérique, palet, etc. ....  | 57 |
| Figure 24. Tribal tabletop en situation (réalisé sous Catia v5) .....   | 58 |
| Figure 25. Modèle CAO du squelette avec ses fixations sous la table (Catia v5) .....  | 59 |
| Figure 26. Stylet pour l'annotation. ....   | 60 |
| Figure 27. Combinaison du stylet et de la Wiimote pour l'exploration d'un modèle 3D .....   | 60 |
| Figure 28. Configuration sur le mur. ....   | 60 |
| Figure 29. Configuration sur table .....  | 60 |
| Figure 30. Schéma de conception du stylet .....   | 61 |
| Figure 31. Table Tactile (technologie <i>DI</i> ) réalisée par les élèves ingénieurs de l'ESTIA .....   | 62 |
| Figure 32. Un exemple d'assemblage des composants. ....   | 65 |
| Figure 33. Hiérarchie en agents PAC de l'application eMotion présentée dans le paragraphe suivant. ....   | 66 |
| Figure 34. Traduction d'une chaîne de composants en une modalité. ....  | 71 |
| Figure 35. Au Louvre (Paris), un parcours de visite particulier : « <i>L'art d'être à table. Rituel et symbolique du repas.</i> » .....   | 75 |
| Figure 36. Moteur vibreur subminiature .....  | 76 |
| Figure 37. En blanc, les cas non explorés dans les systèmes existants .....   | 78 |



## Préambule

---

En préambule de ce document, je souhaite présenter mon parcours au travers des missions successives que j'ai menées et au regard de la construction et de la maturation du projet de recherche que je mène.

### Parcours

---

J'ai passé ma thèse en décembre 1994 sous la direction de Maylis Delest au LaBRI car je me destinais à une carrière d'enseignante. En 1995, j'ai candidaté sur des postes de Maître de Conférences dans différents laboratoires. J'étais classée sur certains mais pas en première position et j'ai obtenu un poste d'ATER à l'université Bordeaux 1, ainsi qu'à l'université de Pau et des Pays de l'Adour. Cependant, j'ai eu au même moment l'opportunité de participer à l'implantation du premier prestataire de service Internet en Aquitaine (le premier en France était à Paris en 1994). Cela m'a attirée et j'ai décidé de participer à cette aventure. En effet, un ami, ingénieur système avait décidé de monter son entreprise (start up) et il souhaitait avoir une personne attirée par l'innovation et capable de prendre en charge des projets, en particulier le projet « Vins de Bordeaux sur Internet<sup>1</sup> ». Chef de Projet Internet, ma mission était à la fois : pédagogique, expliquer les apports d'Internet et ses potentialités en terme de retour sur investissement ; innovante, faire évoluer la norme HTML à ce moment là encore assez pauvre et imaginer des sites WEB commerciaux ; et aussi d'encadrement avec des développeurs et des ingénieurs réseaux à coordonner. Cette expérience a été véritablement enrichissante et enthousiasmante. A contrario, les problèmes inhérents et bien connus des start-up à cette époque ne nous ont pas épargnés. Je me suis alors de nouveau présentée aux concours de Maître de Conférences car je souhaitais reprendre la recherche que j'avais dû mettre entre parenthèse pendant ma mission chez ICARE. C'est à Biarritz, à l'ESTIA que j'ai eu une proposition qui consistait à être pendant un an consultant informatique au CRT ESTIA-INNOVATION puis à l'issue de cette période d'intégrer l'école d'ingénieur ESTIA. Je suis donc à l'ESTIA depuis 1998, sur un poste d'enseignant chercheur depuis janvier 1999, responsable déléguée de la recherche depuis 2001 et responsable du pôle recherche depuis 2007. En 2008, conformément aux vœux de l'ESTIA et de l'université de Bordeaux dans le cadre du quadriennal 2007-2010, j'ai demandé à devenir membre du LaBRI. Le 02 mai 2008, le conseil scientifique du LaBRI a approuvé mon rattachement. En juin 2008, le conseil de laboratoire a entériné ce choix ainsi que mon rattachement à l'Équipe Image et Son dans le thème MVI3D (Modélisation Visualisation et Interaction 3D).

### Evolution du projet de recherche

---

En synthèse, l'évolution de mon parcours en recherche se décrit comme suit. J'ai débuté ma recherche en combinatoire énumérative. Ma thèse avait pour objet l'étude et la réalisation d'un environnement logiciel destiné aux chercheurs en combinatoire : CallCo, acronyme de Calcul et Image en Combinatoire. CallCo permettait, dans un environnement distribué, de manipuler des objets combinatoires, tant sur le plan graphique que sur le plan mathématique. La collaboration, au sein d'un même environnement fédérateur, d'ateliers graphiques, d'ateliers de calcul et d'une base de

---

<sup>1</sup> <http://www.vins-bordeaux.fr>

connaissances, faisait de CallCo un outil puissant d'aide à la réflexion. Les premiers offraient la possibilité de travailler sur le dessin des objets et les deuxièmes sur leurs représentations formelles. En particulier, l'atelier de calcul, écrit en Maple, archivait et classait suivant des critères mathématiques tout objet qui transitait par lui. Cette approche permettait par des méthodes automatiques, de collecter les propriétés vérifiées par des objets manipulés. Enfin la couleur était une composante essentielle de CallCo : elle était le support visuel qui transcrivait les statistiques calculées sur les objets. L'architecture distribuée de CallCo reposait sur un module indépendant appelé GeCI (Gestionnaire de Communication Interactif) ([Rouillon 1994c](#)) que j'ai développé et cédé à l'équipe Metanet<sup>2</sup> de l'INRIA ([Goursat et al. 1994](#)), qui l'a porté sous de nombreux environnements et l'a intégré à Scilab<sup>3</sup>. J'ai repris le principe de cette architecture distribuée dans SIMAPI ([Couture 2002](#)), dans GeoTUI ([Riviere 2009](#)) ainsi que dans CARE ([Clay, Courgeon, Couture, Delord, Clavel et Martin 2009](#)). Bien que mon domaine à l'époque soit la combinatoire énumérative, mon travail était déjà centré utilisateur : le chercheur en combinatoire. Mon approche, encore empirique, mettait la tâche à accomplir au centre de mes préoccupations. J'ai observé comment les chercheurs travaillaient pour concevoir l'outil informatique qui se rapproche le plus de leurs habitudes de travail<sup>4</sup> tout en fournissant un support aux étapes où la difficulté était la plus sensible : « avoir l'intuition d'une bijection entre deux groupes d'objets combinatoires », par exemple entre les polyominos et les mots ou entre les permutations et les arbres. Pour favoriser ce travail, complexe s'il en est intellectuellement, l'interaction devait demander le minimum d'effort cognitif pour favoriser la réflexion et la déduction de la bijection tout en s'appuyant sur des artifices visuels, des distributions de couleurs. Je peux dire aujourd'hui avec le recul que tout en étant dans une des équipes les plus renommées en Combinatoire Enumérative (école de Viennot), je baignais déjà dans le domaine de l'Interaction Homme Machine. Je m'étais d'ailleurs rapprochée de l'équipe de Joëlle Coutaz (LIG, Grenoble) et c'est comme cela que j'ai eu des échanges avec une de ses élèves Sandrine Balbo (Université de Melbourne) alors en poste à Bond University (Australie) et que j'ai passé un mois en Australie ([Rouillon 1994a](#), [Rouillon 1994b](#), [Rouillon 1994d](#)).

Enfin, ce que j'ai découvert en IHM dans ma thèse, je l'ai expérimenté dans mon expérience professionnelle de Chef de Projet Internet et j'ai souhaité m'y consacrer pour mes recherches menées à l'ESTIA.

## **Cadre des travaux**

Ainsi, j'ai initié en 2000, l'axe de recherche « **Interaction Tangible** ». Travailler sur l'interaction tangible était original en France car aucune équipe, en 2000, ne s'intéressait à ce paradigme d'interaction. Aujourd'hui, une petite dizaine d'équipes s'intéressent à l'interaction tangible et mènent des travaux de recherche sur ce thème. Cependant, aucune n'affiche cette thématique comme axe de recherche, ma démarche reste donc encore aujourd'hui originale. De plus, le LaBRI, en 2000, n'affichait pas d'activité

<sup>2</sup> Claude Gomez et Maurice Goursat.

<sup>3</sup> [www.scilab.org](http://www.scilab.org)

<sup>4</sup> Au début de ma thèse, Maylis Delest, ma directrice de thèse, pour me faire comprendre les habitudes de travail (les usages) des chercheurs en combinatoire m'a raconté l'histoire suivante. Le fils d'un combinatoricien de ses amis, à qui l'on demandait ce que faisait son papa comme métier, répondit « Des petits dessins ! ».

directement liée à l'IHM, cela me permettait donc de proposer des travaux complémentaires et donc d'être intéressante pour un laboratoire prestigieux et reconnu comme le LaBRI. Sur le plan international, une communauté était en train de se constituer (Tangint<sup>5</sup>, TEI<sup>6</sup>) dans la veine des travaux fondateurs définis dans les années 1995 au MIT<sup>7</sup> par Iroshi Isshi. J'ai bénéficié en 2001, d'un financement de la CABAB<sup>8</sup> pour une bourse de thèse me permettant de démarrer mes investigations sur l'Interaction Tangible. **Mon travail se situe donc dans le domaine de l'Interaction Homme Machine.**

---

<sup>5</sup> Tangint : [www.tangint.org/](http://www.tangint.org/), I'm a TANGINT WIKI participant since 2005.

<sup>6</sup> <http://www.tei-conf.org>

<sup>7</sup> Massachusetts Institute of Technologie

<sup>8</sup> Communauté d'Agglomération Bayonne Anglet Biarritz



## Introduction

---

Le terme d'interface post-WIMP<sup>9</sup> ([Beaudouin-Lafon 1997](#)) est couramment utilisé pour décrire les interfaces employant les nouveaux paradigmes d'interaction proposés dans la littérature dans le but de rendre l'interaction plus efficace et plus naturelle. L'Interaction Tangible, née à la fin des années 90, fait partie de ces interfaces post-WIMP. Elle a émergé de plusieurs disciplines, en particulier de l'Interaction-Homme Machine (IHM) et de la conception des interactions. Elle s'approprie également en les intégrant les technologies embarquées à base de capteurs. Ce sujet de recherche qui décrivait et rassemblait des recherches de domaine disjoints, a rapidement évolué, pour, au début des années 2000, devenir un domaine de recherche à part entière. De nombreux workshops s'intéressant aux Interfaces Utilisateurs Tangibles ou à l'Interaction Tangible ont alors été tenus. De tous ces échanges, une communauté de recherches interdisciplinaires est née qui a adopté le terme « Interaction Tangible » pour décrire leur centre d'intérêt commun et qui possède sa propre conférence depuis 2007 : *Tangible and Embedded Interaction (TEI)*.

### Qu'est ce que l'Interaction Tangible ?

---

Le terme original est « Interface Utilisateur Tangible » (*Tangible User Interface, TUI*) ([Ishii et Ullmer 1997](#)). Le décalage terminologique entre « Interface Tangible » et « Interaction Tangible » est intentionnel et similaire à celui que l'on trouve entre « conception d'une interface » et « conception de l'interaction ». Le terme « Interaction Tangible » place l'intérêt de la conception sur l'interaction et donc sur l'utilisateur au lieu de la placer sur la partie visible qui est l'interface. Bien que le terme « Interaction Tangible », parce qu'il est plus large et moins strict qu'Interface Tangible, puisse conduire à quelques ambivalences, décrites dans ([Hornecker et al. 2008](#)) la communauté des chercheurs du domaine a décidé d'embrasser clairement la définition étendue. Dans ce contexte, la conférence TEI a, en 2010, changé son nom de *Tangible and Embedded Interaction* en *Tangible Embedded and Embodied Interaction* dans le but d'adopter plus explicitement les recherches sur l'interaction gestuelle et l'interaction avec le tout le corps. Il est donc admis aujourd'hui ([Hornecker 2009](#)) que le domaine de recherche de l'Interaction Tangible inclut l'ensemble des travaux qui se focalisent sur :

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

Il existe donc différentes granularités ou échelles dans l'Interaction Tangible. Pour l'unification de ces granularités, il y a eu trois tendances terminologiques. ([Dourish 2001](#)) proposait le terme de *tangible computing*. Jacob et al., décrit dans ([Shaer et Horneker 2010](#)), p18)) proposaient le concept de *reality-based interaction*. Enfin,

---

<sup>9</sup> Le standard actuel : WIMP (Windows, Icons, Menus and Pointing)

([Hornecker et Buur 2006](#)) ont suggéré le terme de *tangible interaction*. Comme nous l'avons dit précédemment, c'est cette tendance qui a été adoptée. Dans ce même article ([Hornecker et Buur 2006](#)) ont proposé également une taxonomie à l'intérieur du terme Interaction Tangible. Elle est basée sur 3 types de vues : une vue centrée sur les données (*data-centered view*), une vue centrée sur le mouvement du corps et les capacités physiques (*expressive-movement view*) et une vue considérant tout l'espace d'interaction et de perception (*space-centered view*). Les auteurs considèrent que les interfaces tangibles sont associées à la vue centrée sur les données. La vue centrée sur l'espace (*space-centered view*) est pour les auteurs une extension de l'*expressive-movement view* qui, pour les arts par exemple, va englober le mouvement des spectateurs tout autant que ceux des artistes (au sens de *performers*).

Nous relevons des ambiguïtés dans ces terminologies. En effet, de notre point de vue, la prise en compte des mouvements du corps n'est pas séparable d'une vue centrée sur les données. Les mouvements du corps peuvent être choisis pour travailler directement sur les données. Nous illustrons ce point sur la réalisation de plans de coupe dans un volume 3D du sous-sol (cas d'étude traité par ailleurs en 3.2.1 page 55). Dans cet exemple, GeoTUI est une interface tangible qui permet, à partir d'une carte géographique du sous-sol projeté sur une table, de réaliser des plans de coupe dans un volume 3D représentant le sous-sol. Dans ce cas, nous avons, au niveau de la conception, une vue centrée sur les données (au sens de *data-centered view*). Mais, sachant que les géologues et les géophysiciens travaillent parfois sur des données à l'échelle 1 sur des murs d'écrans, il est tout à fait possible qu'ils souhaitent délimiter les lignes de coupe sur ce mur d'écrans (de l'ordre de 10 m. sur 3 m.) avec leurs mains et leurs bras, en se déplaçant le long du mur. Le vecteur d'interaction devient alors le mouvement du corps, pour autant la tâche est identique et est toujours focalisée sur les données pour définir des lignes et plans de coupes. Le distinguo *data-centered view* versus *expressive-movement view*, n'est donc pas satisfaisant dans tous les cas.

De même, le découpage *expressive-movement view* et *space-centered view* ne nous convainc pas. En effet, lors d'une performance où le spectateur est actif, prendre en compte ses mouvements revient, sur le plan de l'interaction avec le système, à considérer plusieurs *performers*. De plus, si les spectateurs sont munis d'objets physiques pour interagir, alors on a clairement une interface tangible en complément des mouvements du corps des *performers* (et éventuellement ceux des spectateurs). Il devient alors difficile avec la taxonomie précédente de déterminer dans quelle catégorie on se trouve. Enfin, utiliser le terme *expressive movement* est ambiguë car il peut être compris comme faisant référence à des mouvements expressifs traduisant une émotion ou un affect (comme nous le traitons en 4.2.2 page 67).

Nous proposons donc en revenant à la notion même de granularité, et 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 grands espaces, de fait, l'utilisateur du système doit bouger parmi et autour de ces objets avec tout son corps. La technologie est alors

embarquée « dans » le corps, dans les vêtements, les rendant d'une certaine façon tangibles. Nous proposons de traduire l'interaction tangible à petits grains par ***tangible close-grained interaction*** et l'interaction tangible à gros grains par ***tangible large-grained interaction***. On notera que le terme original « Interface Utilisateur Tangible » se situe dans l'interaction tangible à petits grains.

## **Relations entre l'Interaction Tangible et des disciplines proches**

L'Interaction Tangible est un domaine très interdisciplinaire. Elle couvre une diversité d'intérêts comme, et en premier lieu, l'Interaction Homme Machine (IHM, *CHI*) ou la conception des interactions (*design of interaction*), mais aussi la conception de produits manufacturés, l'art et l'architecture. De plus, les développements récents en informatique ubiquitaire, sur les capteurs, la robotique et la mécanique contribuent au travers des technologies disponibles au champ de l'Interaction Tangible. Cependant, tout en étant interdisciplinaire, le domaine de recherche de l'Interaction Tangible reste circonscrit aux interfaces et aux systèmes qui sont d'une manière ou d'une autre incarnés physiquement, que ce soit dans un artefact physique ou dans l'environnement.

### **Interaction Tangible et IHM**

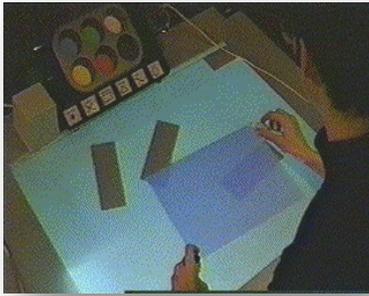
En ce qui concerne l'informatique et l'IHM, les premières interfaces utilisateur qui peuvent être assimilées à des Interfaces Tangibles furent créées à la fin des années 1970 avec les travaux de ([Aish 1979](#)) et de ([Frazer 1980](#)) qui, indépendamment l'un de l'autre, ont proposé de favoriser l'échange entre les futurs clients et les architectes et d'améliorer le dialogue entre les utilisateurs et les logiciels de CAO (Conception Assistée par Ordinateur). La notion d'Interface Utilisateurs Tangible (*Tangible User Interface, TUI*), conçue à la fin des années 90, est une alternative aux interfaces graphiques. Ce type d'interface ramène le calcul dans « le monde physique réel ». Une insatisfaction des systèmes traditionnels (écrans/souris) mais aussi de la réalité virtuelle (*reality center, CAVE* par exemple) qui ont été considérés comme éloignant l'utilisateur du « monde réel », a motivé le développement des premiers prototypes d'Interfaces Tangibles tandis que les innovations technologiques permettaient de les construire comme les capteurs de position et d'accélération ou les capteurs RFID par exemple. On retrouve simultanément, les même concepts, à l'université de Virginie, à l'université de Toronto et au MIT.

**Figure 1. Passive Props**



En Virginie, sous le terme de "Passive Props" ([Hinckley et al. 1994](#)) présente une interface pour la neurochirurgie qui permet de manipuler un crâne 3D affiché sur un écran. Depuis une tête de poupée, qui représente le crâne 3D, l'utilisateur peut spécifier des plans de coupe avec une plaque rectangulaire (voir [Figure 1](#)) et indiquer des trajectoires avec un bâtonnet pour déterminer des chemins chirurgicaux.

Figure 2. GraspDraw



A l'université de Toronto, dans (Fitzmaurice et al. 1995), Fitzmaurice, Ishii et Buxton proposent le concept d'interfaces saisissables (*graspable user interface*), illustré par l'interface GraspDraw (voir Figure 2). Le concept d'interface saisissable introduit l'utilisation de petites briques agissant comme des ancrés physiques pour manipuler l'information numérique. Le concept est d'avoir des fonctions saisissables plutôt que des dispositifs saisissables. Une fonction saisissable consiste en un dispositif d'entrée spécialisé qui est attaché à une fonction

numérique et qui peut servir de contrôle. La souris est considérée comme un dispositif saisissable alors que les transducteurs d'une table de mixage ou les pédales d'une voiture sont des fonctions saisissables. Les fonctions saisissables peuvent être utilisées en parallèle et de manière simultanée.

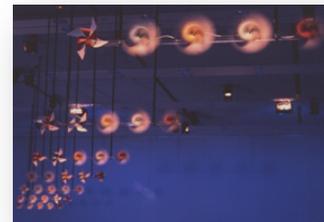
Au MIT, en 1995, Iroshi Ishii crée le *Tangible Media Group*<sup>10</sup> et deux ans plus tard avec Brygg Ullmer dans (Ishii et Ullmer 1997) ils proposent un concept plus puissant que les interfaces saisissables et qui les englobe : les interfaces utilisateur tangibles.

*We live between two realms: our physical environment and cyberspace. Despite our dual citizenship, the absence of seamless couplings between these parallel existences leaves a great divide between the worlds of [computer-generated] bits and [real physical] atoms. At present, we are torn between these parallel but disjoint spaces"*

dans (Ishii et Ullmer 1997)

La tangibilité peut se situer en entrée comme en en sortie de l'interface. Par exemple, dans PinWheels (Ishii et al. 2001), la donnée numérique (ici un flux) est représentée par un phénomène physique et l'utilisateur ne réalise aucun contrôle physique sur la donnée. Le phénomène physique est la vitesse de rotation des hélices, comme le montre la Figure 3. La rotation des hélices traduit par exemple le flux de données représentant le trafic routier dans une rue ou encore des échanges boursiers.

Figure 3. PinWheels



C'est dans la lignée de ces travaux fondateurs que nous avons travaillé sur des interfaces tangibles munis d'interacteurs tangibles (*props*) pour deux domaines spécifiques les géosciences avec GeoTUI et l'archéologie avec ArcheoTUI. Nous présenterons ces applications en 2.2.2 et en 3.2.1. Ces prototypes nous ont également permis de prouver des résultats de portées plus générales présentés en 1.2.1, 1.2.3 et 2.2.3.

### Interaction Tangible et Conception de Produits Industriels

Au tout début des années 2000, on a noté la participation de plus en plus fréquente de concepteurs (au sens *designer*) à des conférences relatives à l'IHM. En effet, au sein de la

<sup>10</sup> <http://tangible.media.mit.edu/>

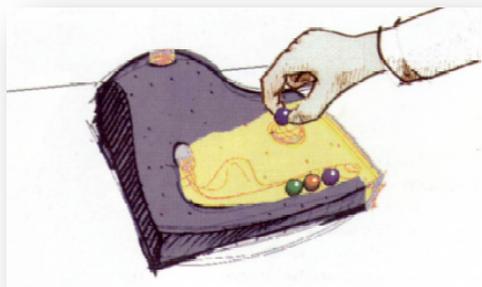
discipline de la conception de produit, l'intégration dans le produit de moyens électroniques et de capacité d'échanges d'informations (informatique) est apparue comme de plus en plus pertinente. D'où, la création d'un nouveau champ d'investigation en conception de produits mécaniques qui s'intéressent à la fusion de la forme physique avec le contenu numérique. Ainsi, la conception de produits s'est intéressée et s'intéresse de plus en plus de nos jours, au comportement des produits. Les concepteurs ont alors besoin de repenser les appareils et dispositifs relatifs aux systèmes d'information pour les rendre explicites et utilisables.

Nous avons donc été précurseurs en nous posant, dès 2001, la question de trouver quelles formes tangibles pouvaient permettre de rationaliser la conception et en particulier la phase d'assemblage (thèse de doctorat de (Garreau 2005)), illustrée [Figure 4](#). Nous avons abordé ce problème en y travaillant de manière interdisciplinaire avec des concepteurs de produits mécaniques de l'ESTIA. Nous avons donc conçu et réalisé le système ESKUA<sup>11</sup>, acronyme de Expérimentation d'un Système Kinésique Utilisable pour l'Assemblage. ESKUA complète la souris et le clavier pour certaines activités du concepteur dans son usage des logiciels de CFAO (Garreau et al. 2005). Le démonstrateur permet de joindre et de manipuler simultanément plusieurs pièces CAO à l'aide des interacteurs que nous avons développés (Depaulis et al. 2005). Les tests que nous avons conduits avec ce prototype ont démontré que l'utilisation de ces interacteurs pour manipuler les objets dans l'espace est réellement pertinente et performante (Couture et al. 2005). Nous revenons sur les résultats que cette application nous a permis de trouver en 1.2.2 et en 2.2.1.

Figure 4. ESKUA



Figure 5. Marble Answering Machine



Le « *Telephone Answering Machine* », [Figure 5](#), de Durrell Bishop, date de 1992 et est décrit dans (Moggridge n.d.). C'est le premier exemple de cette tentative de relier le monde physique au monde numérique. Le concept est un répondeur téléphonique. Le répondeur affiche physiquement les messages vocaux avec des billes, qui peuvent alors être écoutés, supprimés dans n'importe quel ordre. Pour écouter un message, l'utilisateur

prend la bille et le place sur un emplacement défini sur la machine. Ensuite, le message peut être supprimé ou l'utilisateur peut également choisir de stocker les messages, à l'extérieur de la machine dans un récipient. Ce projet signe les débuts du design numérique. Bishop souligne que dans un souci de communication, ce qui est important n'est pas simplement ce que les objets font, mais ce qu'ils véhiculent, et comment ils le transmettent. Il considère qu'il y a une lisibilité immédiate de ces objets contrastant

<sup>11</sup> Eskua est la traduction de « la main » en Euskara, la langue Basque.

avec «l'illisibilité» de l'informatique. Cette remarque est bien sûr à rapprocher de la notion d'affordance de ([Norman 1999](#)).

### Interaction Tangible et Arts Interactifs

En ce qui concerne les Arts Interactifs, des développements similaires sont apparus. Bien des installations utilisent des « espaces interactifs » qui sont conçus pour capter le comportement de l'utilisateur et intègrent des objets tangibles dans l'installation. Souvent, le mouvement du corps tout entier de l'utilisateur est utilisé pour interagir avec cet environnement.

Nous pouvons identifier dès 1998, *Hand-Drawn Spaces*, un spectacle créé à l'initiative de l'illustre innovateur et chorégraphe Merce Cunningham avec la collaboration de Paul Kaiser ([Kaiser 1998](#)) et de Shelley Eshkar de Unreal Pictures. Ce spectacle, présenté au SIGGRAPH' 98, fait office de repère dans le domaine de la danse et de la capture de mouvements. Cette représentation consiste en un paysage virtuel constitué de trois écrans dans lequel des figures dessinées à main levée et saisies par capture de mouvements réalisent une chorégraphie complexe en 3D. Les danseurs apparaissent sous forme de dessins en grandeur nature émergeant de l'obscurité et bougeant dans un espace tridimensionnel apparemment sans limite. Ici, la capture de mouvements n'est pas réalisée en temps-réel et il n'y a que des danseurs virtuels sur scène. En 2002, la même équipe poursuit l'exploration de la capture de mouvements au travers d'un duo similaire à *The Plane* de Troika Ranch. Un élève danseur va danser aux côtés de son avatar projeté. Bien que réalisant les mêmes mouvements que le danseur, l'avatar dégage sa propre personnalité grâce à des mouvements de caméra et à des changements de forme.

En avril 2002 a eu lieu la première de « *The Jew of Malta* » au München Opera Festival<sup>12</sup>, en Allemagne. Il s'agit d'une coproduction du Büro Staubach de la biennale de l'opéra de München et de la société ART+COM. Afin de relier le déroulement de l'histoire avec l'architecture sur scène tout en permettant une représentation ininterrompue, des coupes d'une architecture virtuelle sont projetées sur de grands écrans. Cette architecture est générée en temps réel et dépend de la musique (opéra) mais également de la position d'un chanteur sur scène. Ceci a permis de relier l'histoire et l'architecture sur scène. Les costumes étaient également générés par ordinateur. Grâce à un système de masquage des chanteurs en temps réel et à une tenue appropriée, il fut possible de projeter sur eux de façon dynamique les costumes virtuels. Ce travail se situe dans le paradigme de la réalité augmentée, le résultat est graphiquement époustouflant et artistiquement cohérent.

Enfin, les travaux du Troika Ranch ([Meador et al. 2004](#)) fondé par Dawn Stoppiello et Mark Coniglio en Californie avait pour objectif de faire un trait d'union entre la danse, le théâtre et les media informatiques, avec notamment *The Plane*, duo pour un danseur et son image projetée. Ils utilisaient alors un système de capture de mouvement sans fil de leur conception appelé MidiDancer porté par le danseur. Il devenait alors possible de voir le corps comme un contrôleur pour ordinateur et ainsi de lancer de la vidéo, de l'audio. La raison pour laquelle ils ont créé cet appareil est leur désir d'étendre le

<sup>12</sup> <http://www.buero-staubach.de/index.php?id=400&L=1>

vocabulaire du danseur en lui donnant la possibilité de contrôler des éléments visuels et auditifs qui ne sont traditionnellement pas sous son contrôle. Ici, à la manière d'un musicien qui joue d'un instrument, le danseur va déclencher selon sa volonté des media via le MidiDancer.

En France, les expériences de ce type ont émergé, en particulier en 2006 avec la biennale d'art contemporain de danse à Lyon qui a associé la danse et la technologie. Plus récemment, et près de nous, le festival Le Temps d'aimer La Danse 2010 a fait la part belle aux performances alliant art numérique et danse, comme par exemple la création de Gaël Domenger « Un coup de dés jamais N'abolira le hasard », hommage à Mallarmé et à son poème typographique.

Nous sommes dans les expériences précédentes dans le contexte de l'Interaction Tangible à gros grains avec une interaction par la gestuelle et avec tout le corps.

**Figure 7. Expérimentation du 20 Juin 2008**  
(A. Clay et G. Domenger).



C'est le contexte de la thèse de doctorat de (Clay 2009), que nous avons co-encadré avec Laurence Nigay. Deux approches permettent d'aborder le geste. L'approche "modalités" considère les mouvements des différentes parties du corps. L'approche "fonctionnelle" considère le geste selon les fonctions qu'il remplit. Dans ce travail, nous nous sommes intéressés à l'étude du corps au complet, sans dégradation de l'information. Nous n'avons relevé que peu de travaux en informatique prenant cette même direction, à l'exception de

l'équipe du laboratoire Infomus de Gênes<sup>13</sup>, créé et dirigé par Antonio Camurri. Ce laboratoire s'est attaché depuis ces dernières années à étudier l'expressivité du geste et à reconnaître les émotions par la gestuelle dans diverses situations. C'est également le domaine d'investigation que nous avons choisi : l'informatique affective (*affective computing*), appliquée au domaine de la danse. En guise d'illustration, on peut voir

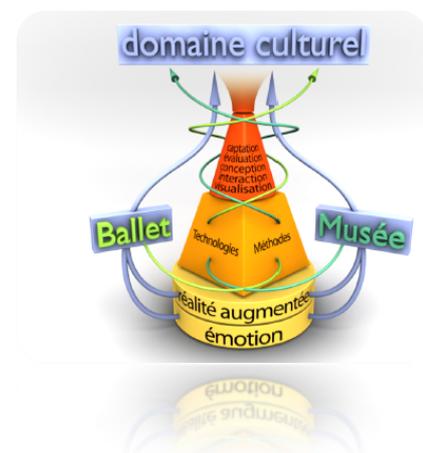
Figure 6, une photographie prise pendant une expérimentation basée sur la capture de mouvement dans le but de réaliser des tests

perceptifs avec le logiciel eMotion (présenté paragraphe 4.2.2.1 page 67). Ces travaux ont conduit à la construction du projet ANR CARE (2007-2011),

Figure 6. Projet ANR CARE (2007-2011) combine la réalité augmentée et l'émotion pour le domaine culturel. L'objectif est de développer des éléments méthodologiques pour la conception et l'évaluation d'expériences culturelles interactives enrichies par la réalité augmentée et l'émotion.

Nous développerons ces recherches au CHAPITRE 4 page 63.

**Figure 6. Projet ANR CARE (2007-2011)**



<sup>13</sup> <http://www.infomus.org/>

## Interaction Tangible et 3DUI

L'ensemble des travaux présentés dans ce mémoire peuvent également être positionné dans le domaine des Interfaces Utilisateurs 3D (*3D User Interfaces, 3DUI*).

Les Interfaces Utilisateurs 3D, sont une partie de l'IHM, qui recouvrent toutes les nouvelles interfaces non-traditionnelles (ou post-WIMP) qui permettent la communication entre un (ou des) utilisateurs avec un ordinateur où l'utilisateur interagit directement dans un espace tridimensionnel (3D) qu'il soit réel ou virtuel. Ce n'est donc pas un champ de recherche aux frontières bien délimitées et strictes. Pour autant, c'est un domaine parfaitement établi, tant sur le plan des méthodes, que des technique, comme en témoigne l'ouvrage ([Bowman et al. 2004](#)), livre de référence dont j'ai repris quelques éléments ci-dessous.

**Figure 8. Premier casque de visualisation par Sutherland et Sproull (Harvard, 1967)**



Les origines remontent à la fin des années 60, donc antérieures à l'Interaction Tangible, avec le premier casque de visualisation ([Sutherland 1968](#)) sur la [Figure 8](#). Elles se poursuivent avec les recherches en réalité virtuelle jusque dans les années 90. On peut ici noter qu'une interaction située dans le paradigme de la réalité virtuelle n'est pas dans le domaine de l'Interaction Tangible. C'est à cette époque qu'a lieu la prise de conscience des chercheurs en réalité virtuelle qui constatent qu'ils ne connaissent pas assez la conception des interfaces pour faire en sorte que les

applications complexes et sophistiquées de réalité virtuelle puissent être utilisables. C'est alors que l'application des principes issus de l'IHM permet de tester leurs utilisabilités et d'en tirer un certain nombre de questions liées à l'interaction avec ces mondes 3D. Ainsi une nouvelle sous-discipline de l'IHM est née sous les appellations : Interaction 3D, Conception d'interfaces utilisateurs 3D, ou encore IHM3D (*3D Interaction, 3DUI Design, 3DUI*). Depuis de nombreux travaux, dont le récent ([González-Calleros et al. 2009](#)), se sont intéressés à généraliser les approches, en particulier en proposant des modèles de conception pour aider le développement des 3DUI.

Ainsi, il existe une large intersection entre les deux paradigmes : « Interaction Tangible » et « IHM3D ». L'Interaction Tangible exclut la réalité virtuelle car pas de physicalité ou de tangibilité dans les interfaces au sein de systèmes de réalité virtuelle. Alors que l'IHM3D exclut la manipulation de données 2D dans un espace plan, par exemple la manipulation de carte sur une table avec un stylo. Nous pouvons aussi constater que dans une Interaction Tangible l'entrée et la sortie (au sens *input/output*) sont mêlées. Ce qui n'est pas systématiquement le cas, bien sur, en IHM3D. L'action de l'utilisateur sur l'interacteur tangible (*input*) renvoie immédiatement une information à l'utilisateur, c'est-à-dire que l'interacteur non seulement a un sens par son pouvoir d'actionner les données mais aussi par son état physique immédiat suite à l'action.

## Approche centrée utilisateurs pour l'optimisation des tâches complexes

En Interaction Tangible, la plupart des cas d'étude et d'application se portent sur l'apprentissage et l'éducation. Notre originalité se situe dans le développement de systèmes fondés sur l'Interaction Tangible appliqués aux métiers : conception de produits, archéologie, géosciences, marketing de vente, revue de projet.

Notre approche est la suivante : déterminer dans la tâche cible ce qui ne se passe pas au mieux avec l'interface traditionnelle (type GUI) et se concentrer sur cette phase. En effet, dans les travaux menés, notre objectif est d'optimiser la tâche et donc de ne jamais perdre la « valeur apportée par le monde virtuel ».

Il convient de remarquer que le développement d'interface tangible relève dans la grande majorité des cas d'une conception dédiée (*special-purpose input device*). Pourtant, la plupart des recherches existantes sur les techniques d'interaction 3D sont orientées vers des techniques génériques et pour une tâche "universelle". Cette généralisation est un avantage dans un souci de réutilisation. Mais, c'est aussi un désavantage car il n'y a pas d'application générique ! C'est d'autant plus vrai dans un contexte de conception d'applications dédiées à des tâches complexes dans des métiers de productions industrielles ou de services. Les domaines réels d'application, tels que ceux que nous abordons (CAO, Géosciences, Archéologie, Informatique affective), ont des propriétés, des contraintes et des exigences spécifiques. Elles doivent donc être prises en compte lorsque l'on conçoit des techniques d'interaction pour ce domaine. Les solutions envisagées alors en étant généralisées apportent largement à la communauté de recherche et au domaine. Citons, pour appuyer notre propos :

*"The design of domain-specific interaction techniques should be one of the next major research topics in 3DUIs."*

dans ([Bowman et al. 2004](#))

Il s'agit donc pour nous, avec un point de vue à la fois technologique et pluridisciplinaire, de développer des systèmes dont le but est l'optimisation de tâches réelles complexes. Le point capital pour optimiser la tâche ciblée est (de notre point de vue) de prendre en compte les compétences et savoir-faire des utilisateurs ainsi que leur expérience dans l'accomplissement de la tâche cible. Ces points sont développés dans ([Couture et al. 2009](#)). Notre démarche consiste donc en la prise en compte de l'utilisateur à tous les stades du projet et de développer une approche centrée utilisateurs.

La conception centrée utilisateur consiste à considérer les utilisateurs et leurs besoins tout au long du processus de développement d'une application informatique. Elle est définie dans la norme ISO 13407 (Processus de conception des systèmes interactifs centrés sur l'humain). Dans la norme ISO 13407, on considère que les utilisateurs finaux sont les mieux placés pour évaluer et influencer le développement d'un produit. Cette affirmation pourrait d'ailleurs être discutée. Si le produit final correspond à leurs besoins, envies et caractéristiques, il aura toutes les chances d'être adopté. Et c'est bien le but ultime de tout produit. La conception centrée utilisateur impose donc que le développement du produit soit guidé par les besoins des utilisateurs en priorité sur les possibilités technologiques. Le concept d'utilisateur final réfère ici à deux types de référents. D'une part, l'utilisateur final réel, c'est-à-dire celui qui utilisera l'application

de façon personnelle ou professionnelle après son lancement. Et d'autre part l'utilisateur final potentiel, qui présente les mêmes caractéristiques que celles de la cible prévue. On fait donc intervenir des participants représentatifs d'un type spécifique de cible (en termes d'âge, de culture, d'expérience avec l'outil informatique, d'expertise dans un domaine de connaissance donné, d'environnement technologique, etc.). Dans nos développements et nos recherches, c'est avec le deuxième type d'utilisateurs que nous travaillons, nous nous appuyons sur l'implication d'experts pour chacun des domaines applicatifs abordés et nous validons donc nos propositions à la fois par de nombreux tests d'ergonomie in-vivo et par des publications conjointes dans des conférences accès sur le métier de notre champ d'application : en collaboration avec Jeremy Legardeur (Innovation, Créativité, IMS, ESTIA) sur l'étude des interfaces en tangible pour la conception mécanique ([Legardeur et al. 2005](#)) et pour l'ingénierie ([Couture, Riviere et Legardeur 2008](#)) ; sur la proposition d'une table interactive tangible pour les géosciences avec Fabrice Jurado (IFP) ([Riviere et al. 2009](#)) ; pour optimiser la tâche d'assemblage virtuel de fragments archéologiques scannées en 3D avec Robert Vergnieux (Historien, Egyptologue, Ausonius) ([Reuter et al. 2008](#), [Reuter et al. 2007](#)) ; sur la création d'interaction tangible pour les arts et la danse avec Gaël Domenger (Danseur, Chorégraphe, Malandain Ballet Biarritz) ([Clay, Delord, Couture et Domenger 2010](#)) ; et dernièrement, nous avons expérimenté un environnement collaboratif basé sur une table et sur un mur pour favoriser la collaboration entre concepteurs lors des revues de projets ([Merlo et Couture 2010](#)) avec Christophe Merlo (Productique, Modélisation des organisations et des systèmes d'information, IMS, ESTIA).

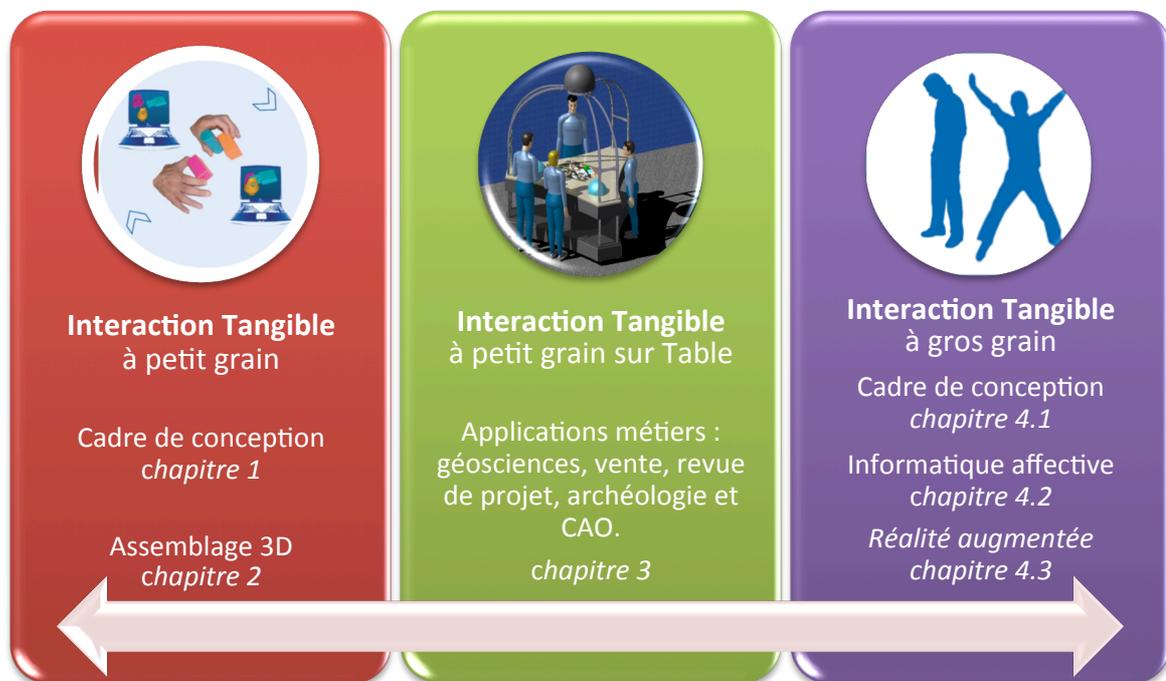
Il ne s'agit donc pas pour nous de seulement demander aux utilisateurs ce qu'ils désirent, mais bien de mettre en œuvre, tout au long du processus de conception, le recueil de données concernant leurs tâches, leurs besoins, puis par des expérimentations leur satisfaction, leur efficacité et leur efficience dans l'utilisation des prototypes issus de nos recherches et qui leur sont proposés.

L'évaluation est capitale dans une approche centrée sur l'usage. De ce fait, chacun des résultats présentés dans ce mémoire a été validé par des expériences utilisateurs, de type exploratoire (*cognitive walkthrough-based user study*) ou/et étude utilisateur comparative (*comparative user study*) pour une évaluation plus précise des performances des utilisateurs. Ce n'est pas l'objet de ce mémoire de décrire l'ensemble des protocoles et des analyses qui ont été conduites. Le lecteur pourra, à cet effet, se référer aux articles ou aux thèses de doctorat qui sont cités. Une synthèse de ces expérimentations a été réalisée dans ([Couture et al. 2009](#)) ainsi qu'une compilation des leçons tirées de ces études expérimentales avec les utilisateurs. Nous présenterons donc, dans ce mémoire, uniquement les résultats qui ont émergés de ces expérimentations.

## Plan du mémoire

Ce mémoire présente l'ensemble de mes travaux sur l'Interaction Tangible menés depuis 2001, une vision synthétique est donnée [Figure 9](#).

Figure 9. Travaux en Interaction Tangible présentés dans ce document



Nous commençons au CHAPITRE 1 par approfondir le cadre de conception des Interfaces Tangibles. Le CHAPITRE 2 est consacré aux Interfaces Tangibles pour l'assemblage de pièces 3D virtuelles. Le CHAPITRE 3 propose de s'intéresser à l'Interaction Tangible multi-surfaces. Quant à l'Interaction Tangible avec tout le corps, elle est traitée au CHAPITRE 4. Nous concluons ce mémoire au CHAPITRE 5.

Les quatre premiers chapitres sont construits de la même façon. Ils commencent par situer le contexte et la problématique du thème de recherche. Puis, ils présentent nos apports au domaine. Ils se terminent par les perspectives de recherche envisagées pour le thème de recherche traité dans le chapitre.

Le lecteur est invité à consulter les vidéos, illustrant les différents systèmes présentés dans la suite de ce mémoire, accessibles depuis ma page Web<sup>14</sup>.

<sup>14</sup> <http://www.estia.fr/~ncouture>



## CHAPITRE 1. Cadre de conception des Interfaces Tangibles

---

### 1.1. L'existant

---

#### 1.1.1. Les systèmes mixtes, la réalité augmentée et la virtualité augmentée

---

Le monde physique et le monde numérique se mélangent dans un système de réalité mixte selon un continuum introduit par ([Milgram et Kishino 1994](#)). A l'une des extrémités de ce continuum (le monde physique), la tâche est incluse dans l'environnement réel de l'utilisateur et à l'autre extrémité (le monde numérique), la tâche est incluse dans l'environnement virtuel, elle est alors purement numérique.

Selon ce continuum, la virtualité augmentée (VA) consiste à inclure des informations physiques dans le monde virtuel. Elle est par construction le paradigme des Interfaces Tangibles. En effet, la tâche se situe dans le monde virtuel et l'utilisateur agit sur l'information numérique en manipulant des objets physiques qui représentent soit l'information numérique, soit un contrôle sur l'information numérique, soit les deux. Un interacteur est l'abstraction d'une entité capable à la fois d'entrée et de sortie dans un système interactif. En conséquence, l'interacteur est un objet mixte qui possède des propriétés physiques et des propriétés numériques, et le système informatique fait le lien entre ces propriétés.

Plus proche du monde physique la réalité augmentée (RA) consiste à inclure des informations numériques dans le monde réel. Il existe deux grands types de systèmes de réalité augmentée.

Premièrement, la réalité augmentée où l'on voit à travers un dispositif (*see-through Augmented Reality*). Il existe deux catégories de dispositifs d'affichage : les affichages portés directement sur la tête (*headworn*) et les affichages qui utilisent un dispositif mobile tenu à la main comme un téléphone portable ou un PDA (*handheld*). En ce qui concerne les premiers, il s'agit de lunettes ou de casques capables d'afficher une image devant les yeux de l'utilisateur. Ces dispositifs se divisent en deux technologies. D'un côté, les dispositifs *optical see-through* apportent une vision directe de la réalité (comme à travers des lunettes classiques). Le dispositif est alors capable d'afficher des éléments virtuels dans une zone du champ de vision. D'un autre côté, les dispositifs de type *video see-through* capturent la réalité grâce à une caméra. Il est plus juste alors de parler de flux vidéo augmenté en temps réel car l'utilisateur ne voit pas son environnement de façon directe mais à travers le flux vidéo capturé et augmenté. En ce qui concerne les affichages qui utilisent un dispositif mobile tenu à la main comme un téléphone portable ou un PDA, une caméra fixée sur le dispositif capture un flux vidéo. Ce flux est ensuite augmenté et affiché sur l'écran du dispositif.

Deuxièmement, la réalité augmentée spatiale (*space Augmented Reality*) s'appuie sur des affichages de types projectifs. Elle utilise des projecteurs permettant d'afficher directement des éléments virtuels sur les objets réels. Cette dernière technique est celle qui s'adapte le mieux à l'Interaction Tangible à gros grains ce qui n'exclue pas son utilisation pour l'Interaction Tangible à petits grains.

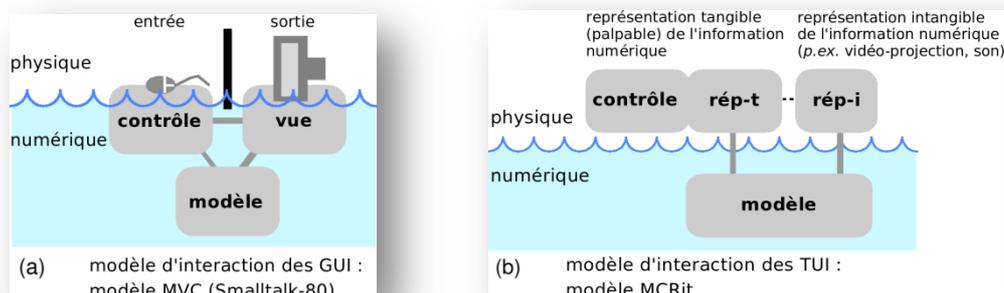
Combinant les paradigmes précédents (RA et VA), Marc Billinghurst, en particulier, a publié quelques travaux<sup>15</sup> sur l'interaction tangible augmentée (*Tangible AR* ou *Tangible Augmented Reality*). Les objets virtuels sont alors « attachés » aux objets physiques que l'utilisateur manipule. Une visualisation 3D de l'objet virtuel recouvre l'objet manipulé qui est repéré par un marqueur. On notera que la visualisation se fait généralement par l'intermédiaire d'un dispositif porté (ou portable) individuel.

### 1.1.2. Le modèle MCRit

Les modèles sont intéressants de par leur pouvoir descriptif et leur pouvoir génératif. A notre connaissance, il n'existe pas de travaux de conception et d'unification pour les interfaces tangibles à gros grains. Ce qui existe, c'est pour les interfaces tangibles, c'est-à-dire ce que nous avons classé dans l'interaction tangible à petits grains.

Un premier modèle nommé MCRpd pour *Model-Control-Representation (physical and digital)* a d'abord été introduit par (Ullmer et Ishii 2000). Puis, (Ullmer 2002) a changé le nom pour MCRit (*Model-Control-Representation (tangible and intangible)*). Par analogie au modèle Modèle-Vue-Contrôleur (MVC) pour les Interfaces Graphiques, Ullmer décrit les différentes entités du monde physique et numérique qui interviennent au sein d'une Interface Tangible, voir Figure 10.

Figure 10. Modèles MVC et MCRit. (extrait de (Riviere 2009), reproduits et traduits de (Ullmer 2002))

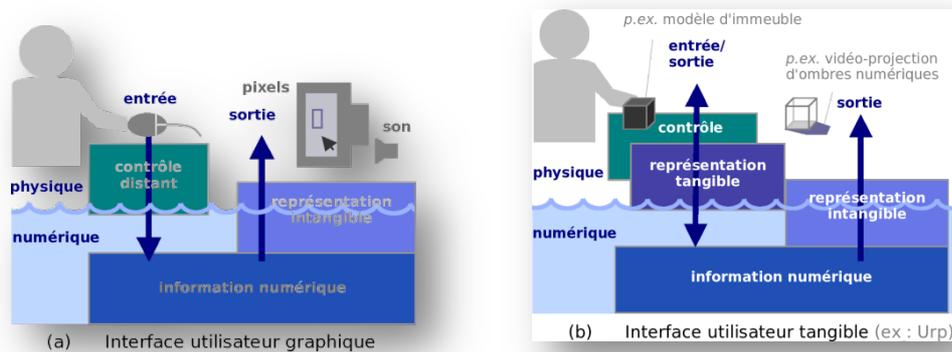


La comparaison avec MVC a pour but de mieux faire comprendre le principe de fonctionnement d'une Interface Tangible, mais le modèle MCRit n'est ni une architecture ni une méthode de conception.

Plus tard, (Ishii 2008) compare les interfaces graphiques et les interfaces tangibles de la manière suivante : une interface graphique représente l'information avec des pixels intangibles retranscrits sur un affichage bit à bit et du son. Des dispositifs d'entrée universels permettent à l'utilisateur de contrôler ces représentations (voir Figure 10-a) ; En donnant une représentation tangible (physique) à l'information numérique, les interfaces tangibles rendent l'information directement saisissable et manipulable avec une rétroaction haptique. Des représentations intangibles synchronisées, comme par exemple une projection vidéo, peuvent compléter les représentations tangibles c'est le cas, vu au paragraphe précédent, de la réalité augmentée tangible, voir Figure 10-b.

<sup>15</sup> Le livre augmenté : [http://www.hitlabnz.org/wiki/Mixed\\_Reality\\_Book](http://www.hitlabnz.org/wiki/Mixed_Reality_Book)

Figure 11. Modèles GUI et TUI (extrait de (Riviere 2009), reproduite et traduite de (Ishii 2008))



### 1.1.3. Les propriétés des Interfaces Tangibles

Quatre propriétés clés des Interfaces Tangibles (TUIs dans la suite) sont proposées dans (Ullmer et Ishii 2000) et confirmées dans (Ishii 2008) :

**Propriété 1.** Couplage informatique des représentations tangibles à l'information numérique sous-jacente : la principale caractéristique des TUIs est que les représentations tangibles sont reliées à l'information numérique et aux modèles informatiques sous-jacents.

**Propriété 2.** Incarnation par les représentations tangibles des mécanismes pour le contrôle interactif : les représentations tangibles servent aussi de contrôle physique de l'information numérique. Les interacteurs tangibles peuvent être inertes, se déplaçant seulement lorsqu'ils sont manipulés directement par les mains de l'utilisateur. Les interacteurs tangibles peuvent aussi être animés par le système informatique (moteurs, retour de force, force magnétique).

**Propriété 3.** Couplage des représentations tangibles, de manière perceptuelle, aux représentations intangibles dynamiques : les TUIs reposent sur un équilibre entre représentations tangibles et intangibles. Bien que l'incarnation tangible des éléments joue un rôle central, et principal dans la représentation et le contrôle d'une TUI, les représentations intangibles jouent aussi un rôle au sein des TUIs. Une représentation intangible au sein d'une TUI médiatise souvent la majeure partie de l'information dynamique fournie par le système informatique sous-jacent. Avoir une réaction immédiate, de la représentation intangible, correspondant à la manipulation de la représentation tangible, est alors un point critique pour assurer la perception du couplage. La coïncidence des espaces d'action et de perception (continuité spatiale des représentations tangibles et intangibles) est aussi une condition essentielle afin d'améliorer la perception du couplage.

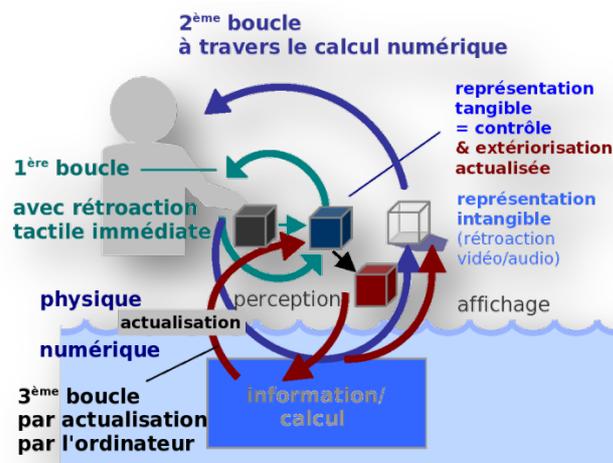
**Propriété 4.** L'état physique des artefacts de la TUI incarne partiellement l'état numérique du système. L'état de la représentation physique doit représenter et correspondre à l'état du modèle numérique. Si l'état du modèle numérique change, l'état de la représentation physique doit changer aussi.

#### 1.1.4. Les boucles de rétroactions

L'interaction graphique peut, selon un modèle simplifié, être modélisée par un utilisateur qui agit sur des dispositifs physiques d'entrée, souris et clavier, et perçoit visuellement les rétroactions sur le dispositif de sortie, les pixels de l'écran. L'interaction tangible peut alors, par similitude, être modélisée par un utilisateur agissant sur un interacteur tangible, percevant le résultat de ses actions au travers du système informatique, mais aussi directement de manière passive au travers de l'objet physique qu'il manipule. Ces concepts sont affinés dans (Ishii 2008) où une modélisation de l'interaction tangible selon trois boucles de rétroaction est proposée, voir Figure 12:

La première boucle de rétroaction haptique passive fournit à l'utilisateur la confirmation immédiate qu'il a saisi ou déplacé l'objet physique. Cette boucle existe de manière intrinsèque dans le monde physique et ne requiert aucune perception ou calcul de la part de l'ordinateur. Aucun délai de temps dû au calcul n'existe dans cette première boucle. L'utilisateur peut manipuler l'objet physique sans avoir à attendre la deuxième boucle de rétroaction (par exemple la confirmation visuelle produite par l'interface).

Figure 12. Boucles de rétroaction des TUIs (extrait de (Riviere 2009), reproduit et traduit de (Ishii 2008)).



La deuxième boucle de rétroaction numérique nécessite la perception par l'ordinateur des mouvements des objets physiques, le calcul d'une réponse à partir des données collectées et l'affichage du résultat comme une rétroaction visuelle (et éventuellement auditive). Ainsi, la deuxième boucle dure plus longtemps que la première boucle.

Enfin, la troisième boucle de rétroaction physique par actualisation permet à l'ordinateur de fournir une rétroaction sur l'état de l'information numérique, quand le modèle change ou qu'il réagit aux calculs (*actuation*). L'actualisation de l'état physique des artéfacts physiques par le système informatique permet de maintenir l'état physique en cohérence avec l'état numérique du système et d'extérioriser les informations numériques autrement que par des rétroactions visuelles ou auditives. Aujourd'hui encore, peu de TUIs utilisent la troisième boucle de rétroaction. A notre connaissance, il en existe quatre : PinWheels (Ishii et al. 2001) (illustrée Figure 3 page18), PICO (Patten et Ishii 2007), les Curlybots (Frei et al. 2000) et Topobo (Raffle et al. 2004) qui se déplacent à l'aide de moteurs. Il est intéressant de noter que l'intégration d'un robot dans un dialogue humain robot où le robot réagit aux actions de l'humain est une implémentation de cette troisième boucle de rétroaction.

Le modèle à double boucle, c'est-à-dire uniquement les deux premières boucles, est le plus répandu et selon Ishii « les TUIs construites sur ce modèle améliorent déjà l'interaction comparées aux classiques GUIs ». Une grande part de la frustration que peut provoquer une GUI est due au délai de calcul de la réponse de l'ordinateur. La première boucle de rétroaction comble cette frustration, avant que la deuxième boucle se produise. En effet, l'utilisateur peut continuer de manipuler les interacteurs tangibles sans attendre impérativement la fin de l'exécution de la deuxième boucle.

### 1.1.5. Les catégorisations

Dans (Fishkin 2004) les TUIs existantes ont été analysées et discutées, dans le but de trouver une fonction applicable à toutes les interfaces et qui permette de déterminer, de façon binaire, si une interface est tangible ou pas. Aucune fonction n'a été trouvée. Fishkin a alors proposé de voir la "tangibilité" comme un attribut à valeurs multiples et il a proposé deux axes : l'axe métaphorique classe les TUIs selon que l'effet d'une action de l'utilisateur sur le système est analogue à l'effet produit par une action similaire du monde réel ; l'axe d'incarnation classe les TUIs en fonction du degré selon lequel l'entrée est distincte de la sortie.

(Ullmer et al. 2005) de leur côté, ont identifié trois grands type de TUIs :

1. les surfaces interactives sur lesquelles les objets tangibles sont manipulés ;
2. les assemblages constructifs constitués d'éléments reliés entre eux ;
3. et les systèmes munis de jetons manipulés dans des espaces contraints (*token+constraint systems*).

Plus récemment, issues de l'observation de l'apparence physique des différents types de TUIs qui ont été développés par la communauté, (Ishii 2008) a étendu la classification précédente à sept genres (ou types) de TUIs. Elles mettent toutes en œuvre la 3<sup>ème</sup> boucle de rétroaction :

4. la téléprésence tangible qui informe à distance par des mouvements ou des vibrations d'objets de l'action d'une autre personne à distance ;
5. les TUIs à mémoire cinétique qui sont capables de reproduire un geste, un mouvement ; les TUIs déformables qui ont la propriété de pouvoir changer de forme, de représentation en cours d'exécution ;
6. les objets augmentés qui sont des objets physiques que l'on manipule tous les jours et qui évoluent avec la technologie en devenant interactifs ;
7. et les médias ambiants qui ne sont pas véritablement des moyens d'interactions puis qu'aucun utilisateur n'interagit avec eux mais qui sont des éléments de l'espace ambiant qui informe par son état d'une situation.

Nous ajoutons à cette classification, un dernier type de TUI :

8. les interfaces tangibles noyau (*core tangible*) proposé par (Ullmer et al. 2008) qui sont des éléments d'interfaces que l'on retrouve dans plusieurs TUIs. Nous discutons des enjeux de ce type d'interface en 1.3.2.

Enfin, en s'appuyant sur la notion *token+constraint systems* d'Ullmer, ([Calvillo-Gamez et al. 2003](#)) a proposé le paradigme TAC qui décrit la structure d'une Interface Tangible comme un ensemble de relations entre les objets physiques et l'information numérique. Le paradigme TAC est à la base du langage de description des interfaces tangibles : TUIML. Cette spécification semi-formelle est une avancée vers une formalisation de l'Interaction Tangible et le découplage de la partie abstraite de l'interaction et de la partie implémentation technologique. Notons, cependant, que TUIML ne permet pas la description de système intégrant des interactions tangibles à gros grains.

## 1.2. Contributions

Il est bien évident que vouloir concevoir une interface tangible conduit à s'intéresser à la fois à la partie logicielle et à la partie matérielle de l'interface. Lorsque le concepteur se pose la question de la forme physique des interacteurs ou du choix des matériaux, il se trouve alors aux frontières de l'acceptation classique du terme IHM. En effet, ces questions sont classiquement traitées par les concepteurs de produits manufacturés. C'est tout l'enjeu du domaine de la conception de systèmes s'appuyant sur l'Interaction Tangible de mixer deux visions de la conception. Pour une argumentation de ce besoin, le lecteur pourra se référer à l'article de ([Baskinger et Gross 2010](#)) dans lequel il est souligné qu'aujourd'hui les concepteurs de produit doivent se pencher sur ces problématiques en prenant en compte le comportement dynamique des objets contrôlés par le monde numérique. Une méthode alliant conception de produit et conception logicielle est donc nécessaire et nous proposons dans la suite un pas vers ce type de méthode ainsi qu'un guide pour l'aide au choix des interacteurs constituant la partie physique de l'interface. Dans une TUI, la plupart des caractéristiques habituellement situées dans la partie logique de l'instrument sont donc transférées dans la partie physique. Cette notion est développée dans ([Beaudouin-Lafon 1997](#), [Beaudouin-Lafon 2000](#)) en s'appuyant sur le modèle de l'interaction instrumentale et il est montré qu'ainsi, l'interaction ayant lieu dans le monde physique, les degrés de comparabilité et d'intégration sont plus élevés que dans une interface WIMP. C'est là un autre enjeu de ce type d'interaction : être capable d'évaluer conjointement la partie matérielle et la partie logicielle.

### 1.2.1. Vers une méthode de conception des Interfaces Tangibles

Publié dans ([Couture et al. 2009](#)) ; Couture, N., Riviere, G. et Reuter, P. (2009), Tangible Interaction in Mixed Reality Systems, in G. P. Dubois E. et Nigay L., eds, 'MIXER - The Engineering of Mixed Reality Systems', Human-Computer Interaction Series, Springer-Verlag, chapter 6, pp. 101-120.

Comme introduit ci-dessus, le concepteur d'une TUI doit concevoir à la fois la partie physique et la partie logicielle de son interface. Pour cette raison, nous recommandons une méthode de conception qui intègre les méthodes classiques du génie logiciel et de la conception de produits. Il en résulte une approche multidisciplinaire qui associe dès le début du processus des représentants de l'utilisateur final, du concepteur de produits manufacturés, et des développeurs. D'une part, ce processus de conception aide le concepteur de la TUI à choisir une forme physique adéquate pour représenter l'information numérique et/ou le contrôle sur l'information numérique. D'autre part, il permet d'intégrer les interacteurs tangibles dans un système interactif. Le point clé est, de notre point de vue, de prendre en compte les compétences et l'expérience, de

l'utilisateur final ciblé, dans l'exécution des tâches que la TUI devra permettre de réaliser.

Du point de vue informatique, nous sommes donc dans une conception centrée utilisateur définie dans la norme ISO 13407 (Processus de conception des systèmes interactifs centrés sur l'humain). Elle consiste à considérer les utilisateurs et leurs besoins tout au long du processus de développement d'une application informatique. Et elle définit les conditions de la mise en œuvre d'un processus centré sur l'opérateur humain selon cinq principes : une préoccupation amont des utilisateurs, de leurs tâches et de leur environnement ; la participation active de ces utilisateurs, ainsi que la compréhension claire de leurs besoins et des exigences liées à leurs tâches ; une répartition appropriée des fonctions entre les utilisateurs et la technologie ; l'itération des solutions de conception ; l'intervention d'une équipe de conception multidisciplinaire. Ainsi, en intégrant les principes de la conception centrée utilisateur dans une démarche de conception de produit, nous proposons un processus de conception en 7 étapes :

**Etape 1** Séance de créativité avec les utilisateurs finaux.

Les réunions sont organisées avec les utilisateurs finaux afin de déterminer le contexte d'utilisation, les scénarios d'utilisation, les données à manipuler, les principales tâches et les difficultés rencontrées dans « l'ancienne façon » de travailler. Nous recommandons à cette étape de bien analyser les conditions de travail et les savoirs faire de l'utilisateur final dans sa manière de travailler avec les outils « traditionnels », généralement de type GUI, voire dans sa manière de travailler, lorsque c'est possible, avant l'arrivée des systèmes informatiques. A l'issue de cette étape, les concepteurs de la TUI fournissent la liste exhaustive des besoins des utilisateurs finaux et pour chacun d'eux des solutions d'interfaces et de techniques d'interaction.

**Etape 2** Objets intermédiaires / démonstrateurs.

Les concepteurs développent des maquettes préliminaires illustrant les solutions adoptées à l'étape 1 et les présentent aux utilisateurs finaux.

**Etape 3** Adaptation des spécifications fonctionnelles et des contraintes.

**Etape 4** Simulations.

Notez qu'à cette étape, les premières maquettes ne vont pas nécessairement utiliser la technologie finale. Par exemple, si la technologie n'est pas disponible ou complexe à mettre en œuvre la technique du magicien d'Oz peut être utilisée pour mener des études sur les premiers utilisateurs (voir par exemple ([Couture et Minel 2006](#)) page 74).

**Etape 5** Mise en situations.

A l'issue de cette étape, la solution technologique finale est décidée ainsi que la technique d'interaction.

**Etape 6** Conception détaillée, développement et Tests.

Les concepteurs développent un prototype de travail.

**Etape 7** Expérimentations avec les utilisateurs.

Les premières études expérimentales sont menées avec les utilisateurs finaux sur le prototype de travail, afin de valider définitivement les choix de conception.

On doit imaginer ce cycle de conception comme une spirale, une démarche qui boucle et reboucle jusqu'à ce que le système satisfasse aux exigences définies à chaque étape.

Nous avons validé le processus de conception décrit ci-dessus en comparant les TUIs conçues avec celles qui étaient attendues. Nous avons constaté un niveau élevé de correspondance entre elles en termes de caractéristiques, de qualités et de fonctionnalités. Notre processus de conception a été confronté aux systèmes ESKUA présenté en 2.2.1 page 44, GeoTUI présenté en 3.2.1 page 55 et ArcheoTUI présenté en 2.2.2 page 47, ce qui a permis sa mise en œuvre et sa mise au point.

### 1.2.2. Une méthode réutilisable basée sur des filtres pour définir les interacteurs pertinents

Publié dans ([Depaulis et al. 2005](#)) ; Depaulis, F., Couture, N., Legardeur, J. et Garreau, L. (2005), A reusable methodology based on filters in order to define relevant tangible parts for a TUI, in SPIA, ed., 'SPIE'05: Proceedings of Electronic Imaging Science and Technology, Stereoscopic Displays and Virtual Reality Systems XII', Vol. 5664, San Jose, USA, pp. 530–539.

Lorsque l'on souhaite concevoir une Interface Tangible qui incarne physiquement la donnée numérique au travers de ces interacteurs, c'est pour pouvoir travailler avec ces objets physiques dans un espace réel, regroupant espace d'action et espace de perception (au sens de ([Norman 1999](#))). Les interacteurs incarnant les données numériques doivent donc être signifiants. Si peu de données numériques sont manipulées, on peut alors imaginer « reproduire », un peu comme une maquette, les données numériques de manière tangible. Se pose cependant alors la question de l'évolutivité du système ! Cependant, dans la plupart des cas, les données sont nombreuses, trop nombreuses pour être reproduites. Ce n'est donc pas une démarche raisonnable et générique. Nous nous sommes alors posé le problème de trouver une solution générique permettant de trouver les interacteurs pertinents pour un domaine donné.

Nous avons bâti notre étude à partir de la problématique d'assemblage de pièces mécaniques modélisées par CAO (Conception Assistée par Ordinateur). D'un point de vue mécanique, et selon les méthodes DFA (*Design for Assembly*) ([Boothroyd et Dewhurst 1993](#)), l'assemblage de pièces peut être décrit en deux tâches principales : le positionnement respectif des pièces et la fixation mutuelle des pièces. Le but principal des méthodes DFA est d'identifier des critères d'assemblage et de permettre leur anticipation dès la phase de conception afin d'engager des actions préventives au plus tôt. Elles permettent de donner un coefficient d'aptitude à l'assemblage manuel d'un produit en se basant sur l'évaluation d'opérations de base concernant le montage : la préhension, la manipulation et l'insertion de la pièce. Lors de l'utilisation des méthodes DFA, l'utilisateur attribue des volumes simples aux pièces CAO : cube, cylindre long et court et parallélépipède. Nous avons repris ce principe pour notre pré-étude et pour la constitution du premier jeu d'interacteurs ([Garreau et al. 2003](#)) nous permettant de mener à bien la première étape de notre méthode : « définir le critère de sélectivité pour les interacteurs ». Notre but était de représenter principalement les assemblages correspondant à des encastremements (assemblages sans mobilité). Ce choix vient du constat que dans la plupart des objets courants, le ratio du nombre de mobilités sur le nombre de pièces est faible. Nous avons alors mis en place une expérimentation permettant de vérifier les hypothèses suivantes : l'utilisation des interacteurs induit-elle une réflexion sur l'assemblage ? Les associations entre un interacteur et une pièce CAO

dépendent-elles de la forme ou des surfaces fonctionnelles ? L'utilisateur crée-t-il naturellement de nouveaux interacteurs si les pièces sont de formes plus complexes ? Tout cela devant nous conduire à déterminer le jeu d'interacteur pertinent pour l'assemblage de pièces CAO.

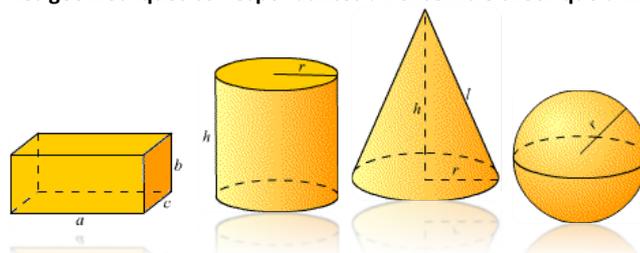
Le protocole expérimental a été mis en place. Le scénario principal était « l'assemblage avec les interacteurs tangibles d'un modèle CAO ». Pour cela nous avons fourni aux sujets une visualisation 3D d'un assemblage CAO, sa vue éclatée et l'ensemble des interacteurs. Nous avons demandé à l'utilisateur de réaliser 10 assemblages avec les interacteurs. Les sujets étaient au nombre de : 1 utilisateur de référence, 2 experts CAO, 1 expert assemblage, 1 utilisateur de CAO et 1 ergonome. Plus de détails peuvent être trouvés dans ([Legardeur et al. 2004](#)). Nous avons nettement distingué que les sujets ont deux approches pour associer un assemblage d'interacteurs à l'assemblage de pièces CAO : une association basée sur un raisonnement à partir des formes géométriques et une association basée sur un raisonnement à partir des surfaces fonctionnelles des pièces CAO. En particulier, il est apparu que l'expert en assemblage (utilisateur privilégié visé) cherchait à identifier en premier lieu les surfaces fonctionnelles afin d'analyser ou d'optimiser l'ensemble du produit. Moins les utilisateurs sont spécialisés dans la tâche d'assemblage moins ils raisonnent sur les surfaces et plus ils raisonnent sur les géométries. Ainsi, nous avons pu établir le critère de sélectivité.

**Critère de sélectivité.** Un objet impliqué dans un processus d'assemblage se définit entièrement pour la tâche d'assemblage par le nombre et le type de ses surfaces fonctionnelles.

A partir du constat précédent mettant en avant l'importance des surfaces fonctionnelles dans la tâche d'assemblage, nous avons élaboré une nouvelle approche présentée dans ([Depaulis et al. 2005](#)) conduisant à la détermination d'un nouveau jeu d'interacteurs disposant de l'ensemble des surfaces fonctionnelles pertinentes. L'objectif de ce travail était donc, de déterminer une méthode reproductible pour « trouver » les interacteurs pertinents d'un domaine en fonction d'une tâche bien déterminée.

Nous avons procédé en deux étapes. La première étape a été de conduire une étude purement théorique sur la tâche d'assemblage à partir des surfaces fonctionnelles et de leurs combinaisons en nous appuyant sur les définitions de ([Rejneri 2000](#)). Cette approche a conduit à un jeu de quatre interacteurs ([Figure 13](#)). Ce jeu est théoriquement suffisant mais à l'évidence trop restreint dans l'usage et donc non exploitable.

**Figure 13. Formes géométriques correspondantes à l'ensemble théorique d'interacteurs**



Nous avons alors combiné cette approche à une approche pragmatique en décrivant un filtre sous la forme d'une propriété tenant compte à la fois du nombre et du type de surfaces fonctionnelles, de la direction de leurs normales, de la position et de la direction de l'axe de la surface de révolution. Ainsi, à partir d'une liste initiale exhaustive des objets du domaine, on peut obtenir par l'application du filtre un jeu d'interacteurs suffisamment réduit et qui reste pertinent.

**Filtre.** Soit  $S$  l'ensemble contenant toutes les surfaces fonctionnelles possibles d'un objet donné. On note  $S = \{sp, ss, sco, scy\}$  où  $sp$  est la surface plane,  $ss$  la surface sphérique,  $sco$  la surface conique et  $scy$  la surface cylindrique. Tout objet  $O_i$  est alors défini par un triplet  $t(O_i) = (s_i, n_i, a_i)$ , où  $s_i$  est une surface fonctionnelle appartenant à  $S$ ,  $n_i$  est le vecteur normal entrant à  $s_i$  et  $a_i$  est l'axe de révolution de la surface  $s_i$ . On dit alors que deux objets  $O_i$  et  $O_j$  sont équivalents dans une tâche d'assemblage si et seulement si  $t(O_i) = t(O_j)$

Nous n'avons pas démontré formellement cette propriété mais expérimentalement elle est apparue comme un bon compromis.

Pour résumer, les étapes méthodologiques sont les suivantes :

- Etape 1** Définir un ensemble des composants du domaine  $\mathcal{E}$ . Cet ensemble doit contenir les éléments les plus utilisés du domaine considéré.
- Etape 2** Etablir le critère de sélectivité.
- Etape 3** A partir du critère de sélectivité, établir le filtre.
- Etape 4** Classer chaque élément de  $\mathcal{E}$  en fonction des caractéristiques utilisées dans le critère de sélectivité pour préparer le passage du filtre.
- Etape 5** Appliquer le filtre à  $\mathcal{E}$ .

À cette étape 5, le sous-ensemble de  $\mathcal{E}$  trouvé peut-être encore trop important. Nous proposons alors de faire une boucle sur  $\mathcal{E}$  : tant que le nombre des interacteurs est supérieur à 20<sup>16</sup>, supprimer les interacteurs qui sont une combinaison de  $n$  interacteurs. A la première itération  $n=2$ , puis à chaque itération  $n$  est incrémenté.

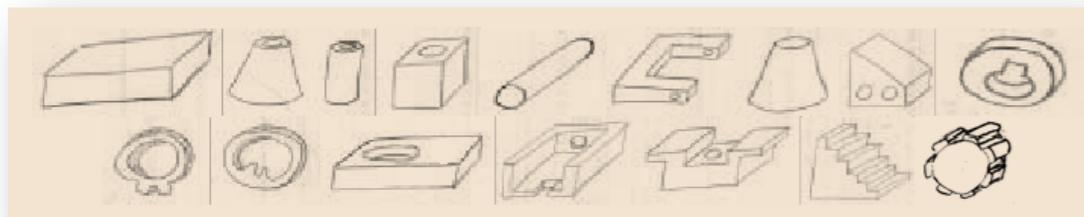
---

<sup>16</sup> La valeur 20 est tout à fait arbitraire et est issue de notre expertise. Il semble qu'un ensemble de vingt éléments est un bon compromis pour maintenir le système utilisable, même si cette valeur n'a pas été démontrée expérimentalement. Dans un autre contexte que l'assemblage de pièce CAO elle pourrait prendre une autre valeur.

**Application** : Dans notre cas d'étude, la CFAO (Conception et Fabrication Assistées par Ordinateur), la liste exhaustive est celle des composants NF E 04-015 ISO normalisés. Cette liste comprend plus de 600 éléments et est pertinente pour l'ensemble des composants de base utilisés pour l'assemblage mécanique. Le premier passage du filtre à fourni un ensemble de 61 éléments. Quelques itérations plus tard s'appuyant sur les deux propriétés restantes le jeu final d'interacteurs comporte 16 éléments représentés

Figure 14.

Figure 14. Jeu d'interacteurs obtenu après les passages de filtres.



### 1.2.3. Des recommandations pour l'évaluation des interfaces tangibles

Publié dans (Couture et al. 2009) ; Couture, N., Riviere, G. et Reuter, P. (2009), Tangible Interaction in Mixed Reality Systems, in G. P. Dubois E. et Nigay L., eds, 'MIXER - The Engineering of Mixed Reality Systems', Human-Computer Interaction Series, Springer-Verlag, chapter 6, pp. 101–120.

Rappelons que dans une TUI, la plupart des caractéristiques habituellement situées dans la partie logique de l'instrument sont transférées dans la partie physique. L'enjeu de l'évaluation de ce type d'interaction est donc d'être capable d'évaluer conjointement la partie matérielle et la partie logicielle. Il n'existe pas à notre connaissance de méthode formelle et générique pour l'évaluation de l'interaction tangible, ni même dans le cas restreint aux interactions à petits grains, pour l'évaluation des interfaces tangibles. Ceci est d'ailleurs une perspective importante du domaine. Nous ne présentons pas dans la suite un protocole et des critères d'évaluation mais des recommandations issues des leçons que nous avons tirées de l'ensemble des évaluations que nous avons conduites.

Pendant nos évaluations, certaines informations ont été recueillies par observation. Par exemple, dans le cas particulier des tables interactives tangibles, les emplacements des objets tangibles sur la table, ainsi que la façon dont l'utilisateur dispose et organise son espace de travail peuvent être observés. En étudiant la position des mains de l'utilisateur sur les accessoires tangibles, on peut distinguer une interaction mono-manuelle ou bi-manuelle, avec un, deux (ou plus) accessoire(s) tangible(s). Il est également intéressant d'étudier comment l'objet tangible est tenu. Est-il saisi avec la main entière ou seulement du bout des doigts ? Est-il tenu au milieu ou aux extrémités ? La position de l'utilisateur est également source d'enseignement. Est-il assis, debout, ou passe-t'il d'une position à l'autre ? Cette observation pourra permettre d'aborder les problèmes d'accessibilité en particulier dans le cas des tables interactives.

D'autres informations relèvent plus de la mise en place d'un programme de trace, qui enregistre les données relatives aux actions de l'utilisateur. Par exemple, pour la

comparaison de deux interacteurs tangibles et de leurs temps de manipulation respectifs pour une tâche donnée.

Nous recommandons donc, lors des évaluations de prévoir un observateur, pour remplir un formulaire permettant d'annoter les valeurs de l'observation ; un enregistrement vidéo pour une analyse a posteriori et pour pouvoir revenir sur des points précis de l'expérimentation ; et enfin la création d'un fichier de logs par un programme de trace. En outre, afin de recueillir une quantité suffisante de données pour évaluer l'interaction tangible proposée, on recommande de faire successivement deux types d'expérimentations. Tout d'abord, une étude de type découverte (*cognitive walkthrough-based user study*) qui va permettre de faire les grands choix d'interaction. Puis, de conduire une étude comparative, plus précise, qui permettra de faire des évaluations de performance. Notons que ces recommandations issues de nos expériences se rapprochent plus d'une méthode d'inspection que d'une méthode d'expérimentation.

Le but de l'expérimentation est d'établir des résultats statistiquement significatifs à partir des critères définis dans le protocole. Afin d'aider l'évaluateur à définir ces critères, nous proposons quelques questions en guise de guide. En répondant à ces questions, l'évaluateur suit les recommandations précédemment introduites.

- Question 1.** Est-ce que l'accessoire tangible est représentatif de son rôle (soit d'incarner une donnée particulière, soit de contrôler des données) ?
- Question 2.** Les accessoires tangibles sont-ils aisément saisissables avec les mains ?
- Question 3.** Les accessoires tangibles sont-ils manipulés par une main, par deux mains, ou même manipulés par plusieurs utilisateurs à la fois ?
- Question 4.** Les accessoires tangibles sont-ils manipulés séquentiellement ou en parallèle ?
- Question 5.** La manipulation des accessoires tangibles influence-t-elle la réalisation de la tâche ?
- Question 6.** L'utilisation des accessoires tangibles comme interface du monde numérique est elle intuitive ?
- Question 7.** L'utilisation des accessoires tangibles est elle efficace ?

Il n'y a pas d'ordre dans ces questions ; elles doivent plutôt être considérées en parallèle. Les 5 premières attendent une simple réponse binaire : oui ou non. Les deux dernières, en revanche, demandent un jugement qualitatif. Le protocole de l'étude avec les utilisateurs doit être mis en place afin que les réponses à ces questions puissent être clairement identifiées, avec des éléments de preuves statistiques suffisantes.

Ces questions sous la forme de guide de conception ont été reprises récemment et appliquées dans ([Kuefner 2010](#)) dans son étude sur Paperbox 3D ([Wiethoff et al. 2010](#)). Paperbox 3D ayant pour objectif le développement rapide des Interfaces Tangibles.

#### 1.2.4. La preuve de l'hypothèse de Fitzmaurice

---

Publié dans (Couture, Riviere et Reuter 2008) ; Couture, N., Riviere, G. et Reuter, P. (2008), GeoTUI: A Tangible User Interface for Geoscience, in 'TEI'08: Proceedings of the 2d International Conference on Tangible and Embedded Interaction', ACM, Bonn Allemagne, pp. 89–96.

En ce qui concerne l'incarnation physique des données, en allant au delà du coté séduisant de manipuler des objets représentatifs de la donnée manipulée, il convient d'établir des résultats validés sur leur supériorités pour l'optimisation de l'accomplissement des tâches auxquelles les interfaces sont destinées. Dans cet esprit une hypothèse a été émise dans (Fitzmaurice 1996) : «En conditions multiplexées dans l'espace, la manipulation d'interacteurs tangibles de forme spécialisée est supérieure (au sens optimisation de la tâche à accomplir) à la manipulation d'interacteurs tangibles de forme générique ». Malgré une forte présomption cette supériorité n'a pas été démontrée et est restée une hypothèse dans (Fitzmaurice 1996).

Pour rappel, les dispositifs d'entrée sont caractérisés selon leur multiplexage dans le temps ou dans l'espace et selon leur forme spécialisée ou générique. Ainsi, une souris contrôle différentes fonctions logiques dans le temps et sa forme ne correspond pas forcément aux caractéristiques de manipulation du contrôleur logique. Alors qu'en conditions multiplexées dans l'espace, chacune des fonctions est contrôlée par un transducteur dédié, chacune occupant ainsi sa propre place. Chaque transducteur peut alors être accessible indépendamment mais aussi simultanément. La forme d'un dispositif physique est spécialisée quand elle correspond approximativement à la forme et aux caractéristiques de manipulation du contrôleur logique.

Lors des phases de transition d'une fonction à une autre, Fitzmaurice et Buxton ont mené des expérimentations sur les phases de manipulation des interacteurs tangibles et ils ont montré une supériorité, en termes de manipulation et d'apprentissage, des entrées multiplexées dans l'espace par rapport aux entrées multiplexées dans le temps. Ils ont ainsi montré que l'acquisition d'un instrument physique en conditions multiplexées dans l'espace est plus performante que l'acquisition d'un instrument logique en conditions multiplexées dans le temps. Cependant, la supériorité de la manipulation, en conditions multiplexées dans l'espace, des interacteurs tangibles de forme spécialisée par rapport à ceux de forme générique n'a pas été démontrée.

Partant de là, nous avons montré que le gain de performance et donc la supériorité des interacteurs tangibles de forme spécialisée par rapport à ceux de forme générique est manifeste lorsque les tâches accomplies par l'utilisateur sont des tâches composées. En effet, pour des tâches élémentaires nous n'avons pas non plus pu montrer une différence significative. Nous avons validé cette hypothèse grâce à une expérimentation utilisateur dont les résultats montrent une différence de temps de manipulation statistiquement significative. Nous avons pour cette expérimentation utilisé le logiciel GeoTUI (présenté page 55). L'expérimentation a duré 9 heures sur le lieu de travail des géophysiciens avec des experts du domaine. L'objectif étant de qualifier 4 types d'interacteurs différents (1 palet, 2 palets, une règle et la souris) pour la sélection d'une ligne de coupe en vue de naviguer dans un bloc de données sismiques en 3D. Il y avait 12 participants, géophysiciens de l'IFP (Pau), 3 femmes et 9 hommes de 23 à 66 ans (41 ans de moyenne). Deux types d'exercices étaient demandés. Le premier consistait en des séries

de coupes (tâche simple) et le second était basé sur l'exploration du cube de sous-sol. Dans ce deuxième exercice les lignes de coupe permettaient à l'utilisateur de résoudre mentalement un problème plus complexe de recherche de particularités dans le sous-sol. L'observation réalisée à un instant donné par l'utilisateur influençait la sélection de la ligne de coupe suivante (tâche composée). Le total de l'expérimentation a correspondu à 96 exercices et 620 lignes de coupes.

Notons, que les protocoles des expérimentations menées par Fitzmaurice et menées sur GeoTUI diffèrent par deux facteurs principaux : la coïncidence des espaces d'action et de perception et la nature des tâches accomplies. Sur GeoTUI les espaces d'action et de perception coïncident, ainsi son degré d'indirection est meilleur que sur l'interface utilisée pour l'expérimentation de Fitzmaurice. Mais ce meilleur degré d'indirection n'explique pas les meilleurs résultats observés sur l'utilisation d'une forme spécialisée (la règle) par rapport à une forme générique (l'interacteur tangible 2-Palet). En effet, sur GeoTUI l'interacteur tangible de forme spécialisée est significativement plus performant pour la tâche composée du deuxième exercice, mais pas pour les tâches élémentaires du premier exercice. Les tâches élémentaires accomplies lors du premier exercice peuvent souffrir de l'effet d'apprentissage dû au fait que cet exercice est effectué avant le deuxième. Mais, Fitzmaurice a montré lors de ses expérimentations que l'apprentissage est très rapide en conditions multiplexées dans l'espace. Les observations menées lors de l'expérimentation sur GeoTUI indiquent aussi une prise en main très rapide en conditions multiplexées dans l'espace. L'effet d'apprentissage est donc minime et la nature de la tâche reste le facteur principal.

Nous avons donc montré dans ([Couture, Riviere et Reuter 2008](#)) que lorsque l'utilisateur doit résoudre une tâche complexe, et donc mener une réflexion approfondie, un interacteur tangible de forme spécialisée est plus efficace qu'un interacteur de forme générique. Une application directe de ce résultat est d'aider le concepteur à choisir les interacteurs tangibles. Pour limiter le nombre d'interacteurs tangibles qui composent une interface, les tâches composées seraient réalisées par ceux de forme spécialisée alors que les tâches élémentaires seraient réalisées par des interacteurs tangibles de forme générique qui peuvent être utilisés pour plusieurs tâches. Un interacteur tangible de forme spécialisée est ainsi dédié à une tâche et un de forme générique est affecté à plusieurs tâches, ce qui permet de limiter le nombre d'interacteurs tangibles (cf. problématique du paragraphe 1.2.2). Notons tout de même qu'il est judicieux d'affecter des interacteurs dédiés (qu'ils soient de formes spécialisées ou pas) aux tâches récurrentes (qu'elles soient des tâches composées ou élémentaires).

### **1.3. Perspectives pour le cadre de conception des Interfaces Tangibles**

#### **1.3.1. Modèle MCRIT et boucles de rétroaction confrontés à l'Interaction Tangible à gros grains**

En partant de la taxonomie proposée au début de ce mémoire : interaction tangible à petits grains et à gros grains, nous pensons qu'il sera riche d'enseignement, en terme de conception, d'étudier le pouvoir descriptif et génératif du modèle MCRit (conçu pour l'interaction tangible à petits grains) en l'appliquant aux interfaces tangibles à gros grains et au besoin en l'adaptant.

De même, il faudrait confronter le principe des 3 boucles de rétroaction de Ishii aux interfaces tangibles à gros grains. Nous avons dans ce contexte d'interaction tangible gros grains proposé un système qui implémente d'une certaine façon la boucle de rétroaction. Nous le présentons en page 74 partie 4.2.3. Le potentiel de cette troisième boucle de rétroaction d'Ishii (vu page 30) reste encore à creuser comme l'ont montré ([Blackwell et Edge 2009](#)). L'un des freins est notamment la faisabilité technique de la mise en œuvre de la rétroaction mécanique. De nouveaux systèmes sont cependant prometteurs pour créer des artefacts physiques qui se déplacent, qui s'animent ou qui se déforment. Dans cette perspective, l'effort de conception sur les interacteurs doit être renforcé pour transformer les interacteurs en modalité de sortie. Ainsi, la cohérence entre l'état numérique et l'état physique du système, qui résulte de l'intégration de cette troisième boucle, ouvre le champ des possibles pour le retour de l'information numérique au-delà des modalités visuelles et auditives qui sont aujourd'hui notre quotidien.

### 1.3.2. Core Tangible

Sur le plan de la conception des Interfaces Tangibles, on constate que certaines interfaces sont proches dans leurs principes et dans leurs modèles d'interaction permettant ainsi de les classer dans les taxonomies proposées (cf. la partie Catégorisations en 1.1.5). Cependant, et Brygg Ullmer a été le premier à le souligner, aujourd'hui encore la plupart des interfaces tangibles sont construites "*from scratch*" à partir de systèmes électroniques faits sur mesure, et généralement elles ne peuvent pas interagir entre elles. Par analogie, c'est un peu comme si l'on construisait un ordinateur et développait un système d'exploitation et un logiciel à chaque fois que l'on souhaite réaliser une application pour PC ... d'autant plus qu'aucune de ces applications ne pourrait partager un écran commun, ou encore un clavier, des fichiers, des imprimantes, etc. Cette approche empêche le développement à grande échelle et le déploiement de ces systèmes. Il y a à peu près 30 ans, les interfaces graphiques connaissaient la même situation si l'on se réfère à la période qui s'étend des années 1950s avec le SAGE ([Astrahan et al. 1957](#)) jusqu'aux années 1980s avec l'Apple<sup>17</sup> et le Star<sup>18</sup> ([Johnson et al. 1989](#)). De plus, c'est l'évolution vers des éléments graphiques communs et la naissance des interfaces WIMP (*windows, icons, menus, pointer*) ainsi que l'interopérabilité des applications (coexistence d'applications sur un écran partagé par exemple) qui ont aidé à déclencher puis à stabiliser la révolution de l'ordinateur personnel.

En bref, il n'existe pas, aujourd'hui, de standard pour les périphériques d'entrée et de sortie des interfaces tangibles. Il résulte de ce constat, sur le plan de la lisibilité du domaine, un certain éparpillement. Des efforts ont été faits pour développer des boîtes à outils et des bibliothèques pour aider l'implémentation de prototypes d'interfaces tangibles. Citons, les ([Phidgets n.d.](#)) et des systèmes analogues décrits page 83 et 84 de ([Shaer et Horneker 2010](#)). Le classique ([ARToolKit 2.72](#)) pour la réalité augmentée est également fréquemment utilisé pour le développement d'interfaces tangibles bien qu'il

<sup>17</sup> En 1976, Steve Jobs et Stephen Wozniak, Macintosh, conçoivent le premier micro-ordinateur utilisable relié à un écran et un clavier : l'Apple 1. Puis, ils construisent l'Apple 2 en 1977 qui devient l'ordinateur personnel standard.

<sup>18</sup> Le star conçu en 1981 au Xerox Palo Alto Park Research Center.

n'ait pas été spécifiquement développé pour elles. L'ARToolKit fonctionne à partir de marqueurs repérés par une caméra. Tout comme ([reactIVision 1.4](#)) dédié à l'interaction tangible sur table qui, et c'est un pas vers la standardisation, introduit le protocole ([TUIO Protocol 2.0](#)) et son API pour l'interaction avec des surfaces tangibles et tactiles (*multitouch*).

Le concept des interacteurs tangibles noyaux (*core tangible*), proposé par Brygg Ullmer en 2006<sup>19</sup>, montre la volonté d'aller vers une convergence, en particulier pour assurer certaines opérations de manière uniforme. Les interacteurs tangibles noyaux permettent d'assurer de manière relativement uniforme la représentation et le contrôle des opérations communes à diverses interfaces de type TUIs. Par exemple, l'interface tangible TUISTER ([Butz et al. 2004](#)) permet la navigation dans toutes structures hiérarchisées. Les opérations dites noyaux (*core operations*) sont un ensemble d'actions qui sont communes à travers un large éventail d'applications. Elles incluent l'ouverture et la fermeture de programmes, la sauvegarde et le chargement de fichiers, la navigation dans une arborescence de fichiers, le réglage de divers paramètres, etc. Ces opérations peuvent être groupées en 3 catégories : les opérations noyaux internes à une application, par exemple le chargement et la sauvegarde des données, la manipulation discrète ou continue de paramètres ; les opérations noyaux externes ou inter-applications, par exemple le lancement et la fermeture d'un programme, le transfert de données entre deux applications ; enfin, les opérations noyaux dédiées à un type d'application, comme les actions spécifiques aux jeux, aux logiciels de traitement de texte ou à la manipulation des photos.

Travailler sur les interfaces tangibles noyaux est une perspective importante pour le domaine des Interfaces Tangibles et nous nous y associons pleinement. Nous avons commencé à explorer ces interfaces tangibles noyaux au travers d'un mémoire de recherche étudiant<sup>20</sup> puis lors du post-doctorat de G. Riviere réalisé auprès de Brygg Ullmer, au *Center for Computation & Technology (CCT)* de l'Université de l'Etat de Louisiane aux USA (LSU) fin 2009. Depuis 7 ans, Ullmer œuvre à bâtir une évolution similaire à celle qu'ont connue les interfaces graphiques pour les interfaces tangibles. Il a en particulier identifié des éléments communs ([Ullmer et al. 2008](#)): les menus tangibles (*tangible menus*) et les casiers interactifs (*interaction trays*).

Notre objectif est d'utiliser les interfaces tangibles noyaux proposées par Brygg Ullmer, et son équipe du CCT de l'Université de l'Etat de Louisiane (LSU), au sein des interfaces que nous avons développées : ESKUA (partie 2.2.1), ArcheoTUI (partie 2.2.2) et en particulier au sein de GeoTUI (partie 3.2.1). En effet, GeoTUI qui est une interface tangible pour les géophysiciens qui travaillent avec des données géologiques intéresse plus particulièrement le LSU car, d'une part, GeoTUI peut potentiellement compléter les recherches en visualisations géophysiques du Prof. Bijay Karki et, d'autre part, le laboratoire d'Ullmer a de nombreux échanges avec Schlumberger.

<sup>19</sup> Ullmer, B. Core Tangibles and Tangible Visualizations: prospects for tangible convergence and divergence. Atelier "New Interaction Styles" à CHI'2006. <http://www.cs.tufts.edu/~jacob/workshop/papers/ullmer.pdf>

<sup>20</sup> Antoine Leroux (ESTIA 2ième année) « *Core Tangible* » en 2008.

## CHAPITRE 2. Interfaces Tangibles pour l'assemblage de pièces 3D virtuelles

---

### 2.1. Problématique

---

#### 2.1.1. Manipulation et degrés de libertés (DOF)

---

L'assemblage d'objets virtuels consiste pour l'utilisateur à manipuler en un même temps deux fois 6 degrés de liberté (*DOF*). C'est-à-dire réaliser des translations et des rotations des objets virtuels 3D dans l'espace virtuel 3D dans le but de les mettre en correspondance. Les périphériques d'interactions classiques, comme la souris, qui est un périphérique d'entrée à 2 *DOF*, et le clavier, s'avèrent alors vite peu performants pour cette tâche. Faire des translations et des rotations sur un unique objet virtuel dans un espace 3D est déjà relativement difficile car l'utilisateur doit changer d'axe de rotation très souvent et donc mettre en jeu un assez grand nombre d'actions. Alors, traduire et faire tourner deux objets virtuels en même temps pour les mettre en correspondance relative est encore plus difficile et cela devient presque impossible alors de se concentrer sur la véritable problématique de la tâche d'assemblage selon des critères métiers.

#### 2.1.2. Technique d'interaction

---

Utiliser une interface tangible pour faire de l'assemblage n'est pas une idée nouvelle, cela a par exemple été réalisé pour des pièces de type lego avec les ActiveCubes de ([Kitamura et al. 2001](#)). Cependant, dans les deux contextes que nous avons explorés (Conception Assistée par Ordinateur et Archéologie) les formes à assembler sont très complexes, ce qui a pour conséquence pour l'utilisateur, pour qu'il n'ait pas de surcharge cognitive, de ne pouvoir manipuler que deux objets à la fois à un instant donné. Le nombre d'interacteurs à manipuler à un instant  $t$  est donc réduit à deux, et c'est une technique d'interaction bi-manuelle basée sur le cadre conceptuel de ([Guiard 1987](#)) qui doit être proposée. Dans ce contexte d'interaction bi-manuelle d'autres systèmes ont été réalisés, citons à titre d'exemple ([Pierce et al. n.d.](#)), ou encore ([Buxton et Myers n.d.](#)), une part de leur succès a été attribuée au bénéfice obtenu sur le plan de la charge cognitive ([Leganchuk et al. 1998](#)). En particulier, un travail fondateur de ces approches se trouve dans ([Hinckley et al. 1994](#)). Des objets réels sont utilisés en tant qu'interface pour la visualisation en neurochirurgie. La technique d'interaction proposée pour l'assemblage de pièces virtuelles consiste à fournir à l'utilisateur deux interacteurs. Ces interacteurs sont tenus dans chaque main, et tous les mouvements (translations et rotations) que l'utilisateur effectue avec les interacteurs sont immédiatement reproduits à l'écran sur les deux objets numériques qui leur sont associés. Les positions et orientations 3D des objets physiques sont directement associées aux objets virtuels correspondants affichés sur l'écran.

## 2.2. Contributions

### 2.2.1. Mise en position relative en CFAO : ESKUA

Publié dans ([Garreau et al. 2005](#)) ; Garreau, L., Legardeur, J. et Rouillon Couture, N. (2005), 'Une plateforme basée sur les interfaces tangibles pour l'assemblage en CFAO', Interaction homme-machine et CAO (Revue internationale d'ingénierie numérique (RIIN)) 1(2), 133-148.

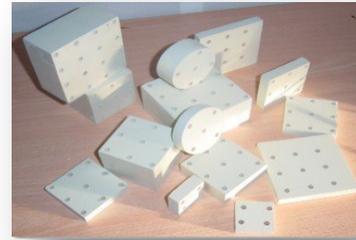
La conception de produit est une discipline qui a fréquemment recours aux outils informatiques pour assister le développement d'un objet technique. De nombreux domaines comme la mécanique ou l'architecture, font appel aux outils de la Conception et de Fabrication Assistées par Ordinateur (CFAO) pour définir les formes du futur produit et générer des données nécessaires à sa fabrication. Cependant, dans le domaine de l'assemblage mécanique, les logiciels de CFAO, tout en aidant le concepteur dans sa tâche, masquent certains problèmes liés aux opérations effectuées sur les lignes de montage : par exemple, les difficultés de mise en position relative de deux pièces avant fixation, d'où cette sensation soulignée par Bishop, d'une certaine « illisibilité ». Nous faisons ce constat car les concepteurs ne sont pas vraiment confrontés dans les environnements actuels de CFAO à la mise en œuvre réelle des opérations de montage. Ces fonctionnalités proposées par les logiciels ne tiennent pas vraiment compte de la difficulté de la mise en œuvre réelle, sur la chaîne de production, des opérations de montage associées à chaque pièce. Les contraintes réelles sont occultées par les fonctionnalités des logiciels de CAO existants. Par exemple, les fonctions de coaxialité masquent la complexité de la mise en position relative de deux pièces dans le domaine réel. Par ailleurs, les problèmes de préhension, d'inaccessibilité ou de collisions des pièces ne sont pas toujours perceptibles par l'utilisateur qui assemble les pièces CAO avec des périphériques tels que la souris et le clavier.

Ainsi, l'offre actuelle des logiciels et des périphériques associés (souris, *spacemouse*, etc.) ne permet pas d'assister les concepteurs dans la prise en compte de contraintes qui sont plus ou moins subjectives concernant les difficultés d'assemblage de certaines pièces. De ce fait, cette situation conduit à des propositions de produits qui sont parfois très coûteuses en termes d'assemblage, sources d'incidents sur les lignes d'assemblages, et de pertes de temps. Des études sur des cas industriels ont montré que le concepteur dans son environnement de travail (bureau d'étude) n'est donc pas toujours en mesure de rationaliser sa propre création. Or l'activité d'assemblage représente 30% à 40% du coût de fabrication d'un produit manufacturé et environ 30% des investissements en moyens de production pour les entreprises ([Schepacz 1991](#)). Le point de départ de ces travaux est donc de prendre en compte les contraintes réelles d'assemblage le plus tôt possible dans le processus de conception, afin de permettre au concepteur de mener une réflexion plus accrue sur l'activité d'assemblage. Nous avons donc proposé le système ESKUA<sup>21</sup>, une interface tangible pour le concepteur en bureau d'étude, utilisable au quotidien pour l'aider dans la tâche particulière d'assemblage de pièces mécaniques modélisées sous CAO. Pour concevoir ce dispositif, nous avons mené un travail pluridisciplinaire pour étudier le domaine d'application de l'assemblage en CAO, puis la taxonomie des tâches, cibler une tâche en particulier, déterminer les objets d'interaction

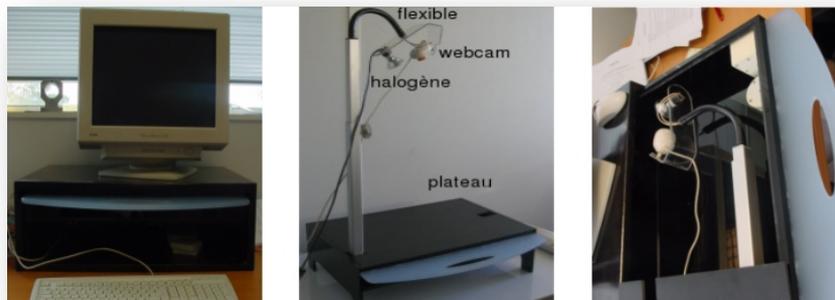
<sup>21</sup> ESKUA est l'acronyme de Expérimentation d'un Système Kinésique Utilisable pour l'Assemblage. Le mot ESKUA signifie également « la main » en Euskara, la langue Basque.

en lien avec l'utilisateur. Nous avons choisi une approche centrée utilisateur en observant à la fois les rôles des objets physiques et les rôles des objets virtuels manipulés par l'utilisateur au cours de la réalisation de la tâche métier visée : l'assemblage de pièces en CFAO. Ce travail nous a permis à la fois de définir un ensemble cohérent d'accessoires physiques (photographiés [Figure 15](#)) et un système intégré dans l'environnement de l'utilisateur permettant de répondre avec pertinence à une difficulté liée au métier de l'utilisateur. Comme on peut le voir [Figure 16](#), ESKUA ne modifie pas l'espace de travail et peut se ranger et se sortir assez aisément. La plate-forme se positionne sous le moniteur dans un caisson.

**Figure 15. Interacteurs issus des méthodes DFA (cf. paragraphe 1.2.2) en résine KUVVO 15040 peints**



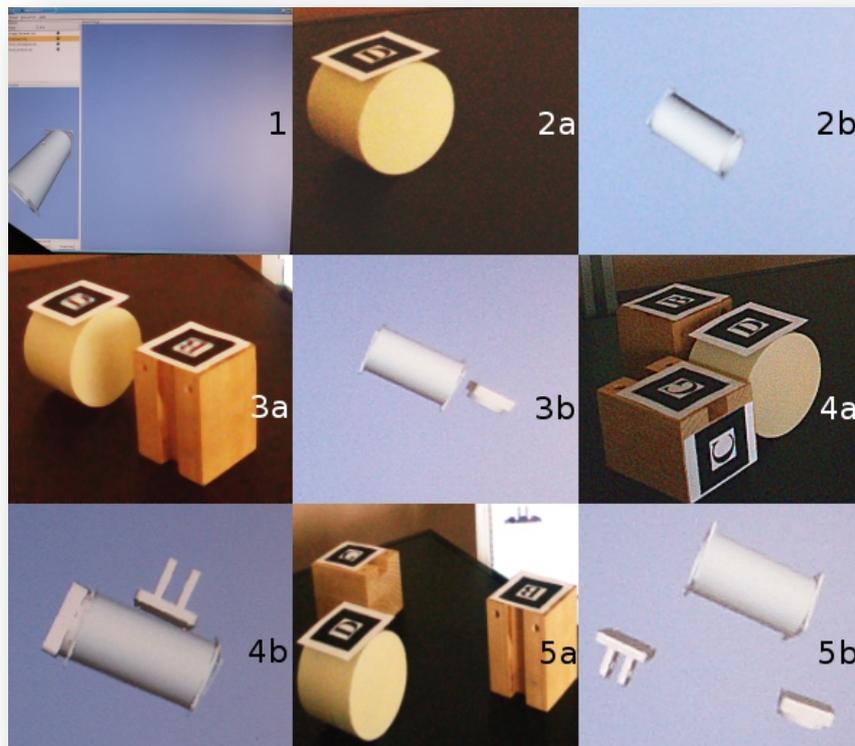
**Figure 16. La plate-forme ESKUA : rangée sous le moniteur (à gauche), dépliée lors de son utilisation (au centre) et la caméra repliée en vue du rangement de la plate-forme (à droite)**



La reconnaissance des interacteurs se fait par traitement de l'image capturée par la caméra. Dans une première version cela a été réalisé par reconnaissance de marqueurs verts (méthode réutilisée plus tard dans GeoTUI cf. page 55 paragraphe 3.2.1) puis dans une seconde version avec le système ([ARToolKit 2.72](#)). Nous avons écarté une solution à base de capteurs de positions et d'orientations, car compte tenu du nombre d'interacteurs (une trentaine, cf. [Figure 15](#)) et de leur conformation (la forme et le respect des surfaces fonctionnelles sont importants) cela aurait été trop coûteux et trop peu flexible pour un projet de recherche.

L'interface graphique est le lien visuel entre les interacteurs et les pièces CAO. Elle est composée ([Figure 17-1](#)) de trois cadres. Le premier affiche une prévisualisation 3D de la pièce CAO sélectionnée. Le second cadre affiche la liste des pièces CAO importées pour la session de travail en cours et permet leur sélection. Le troisième cadre est la vue principale des pièces CAO associées à des interacteurs.

Figure 17. Scénario d'utilisation d'ESKUA

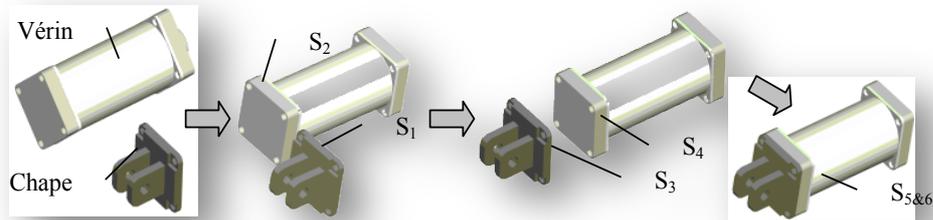


Grâce à l'interface logicielle, l'utilisateur crée un projet et importe les pièces CAO à partir d'une liste proposée. Pour réaliser l'association entre un interacteur et une pièce CAO, l'utilisateur dispose un interacteur sur le plateau (Figure 17-2a) puis sélectionne une pièce CAO dans la liste et valide l'association. A partir de ce moment, l'utilisateur manipule l'interacteur pour déplacer la pièce CAO dans la scène. De la même manière, l'utilisateur ajoute de nouvelles pièces CAO en utilisant d'autres interacteurs (Figure 17-3a et 3b). Toutes les actions de déplacement des interacteurs sont reproduites sur les pièces CAO associées dans la vue principale (Figure 17-2b). Les positions des interacteurs reflètent les positions des pièces CAO, comme illustrées par les séries 4a, 4b, 5a et 5b de la Figure 17.

Nous avons donc pu montrer dans (Garreau et al. 2005) en nous appuyant sur un exemple classique de CFAO, l'assemblage d'une chape sur un vérin, illustré Figure 18, que grâce à ESKUA et sa proposition d'une interaction tangible et la difficulté de mise en position, par exemple l'alignement des pièces, vont naturellement apparaître dans l'interaction. Après avoir réalisé ses manipulations, le concepteur prend conscience des difficultés réelles d'assemblage (mise en position et maintien des pièces) liées au contact de type plan/plan entre la chape et le vérin par exemple. De ce fait, il peut alors engager une réflexion et modifier le principe d'assemblage pour faciliter le montage de la chape dans notre cas. Nos propositions d'interacteurs offrent au concepteur la possibilité de réaliser une simulation du montage en lui permettant d'identifier les

difficultés dans un premier temps, et de modifier la conception des pièces dans le but de simplifier le montage.

Figure 18. Assemblage chape sur vérin



### 2.2.2. Reconstruction de fragments archéologiques : ArcheoTUI

Publié dans (Reuter et al. 2007) ; Reuter, P., Rivière, G., Couture, N., Sorraing, N., Espinasse, L. et Vergnieux, R. (2007), ArcheoTUI - a tangible user interface for the virtual reassembly of fractured archeological objects, in 'VAST2007: Proceedings of the 8th EuroGraphics International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage', EuroGraphics Association, Aire-la-Ville, Switzerland, pp. 15-22.

Publié dans (Reuter et al. 2010) ; Reuter, P., Riviere, G., Couture, N., Mahut, S. et Espinasse, L. (2010), 'ArcheoTUI - Driving virtual reassemblies with tangible 3D interaction', Journal on Computing and Cultural Heritage (JOCCH 2010) 3(2), 1-13.

Figure 19. Photographie des fragments d'une fontaine.



Les fragments archéologiques trouvés sont souvent brisés en un grand nombre de fragments et les archéologues sont confrontés à la reconstruction de « puzzles 3D » d'une grande difficulté comme l'illustre la photographie de la [Figure 19](#). Scanner les fragments puis les assembler virtuellement, comme cela est fait sur [Figure 20](#), est une solution élégante et c'est même parfois la seule solution.

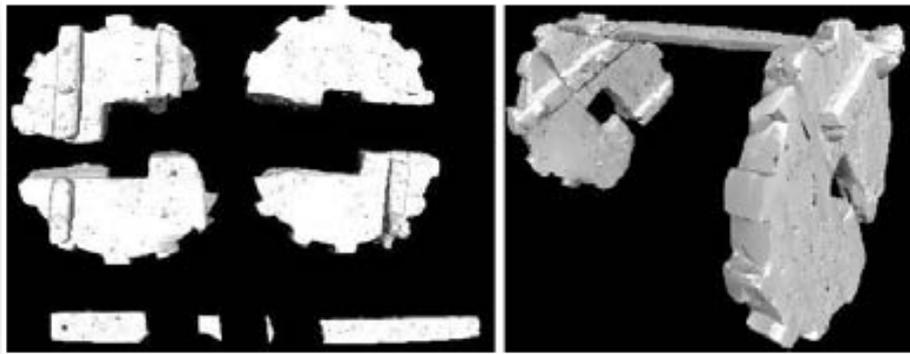
Là encore, comme nous l'avons vu dans le paragraphe précédent, une interaction efficace de la part de l'utilisateur pour orienter et mettre en position les pièces 3D est essentielle. On peut, d'ailleurs, compléter ces interfaces purement manuelles par des techniques de mise en correspondance automatique. Nous y reviendrons dans la section consacrée aux perspectives de ce chapitre.

Nous avons donc conçu l'interface tangible ArcheoTUI sur la demande d'archéologues<sup>22</sup> et en collaboration directe avec eux dans le but de faciliter, et dans certains cas de

<sup>22</sup> Collaboration avec l'équipe de Robert Vergnieux, <http://archeotransfert.cnrs.fr/>, en particulier avec Loïc Espinasse.

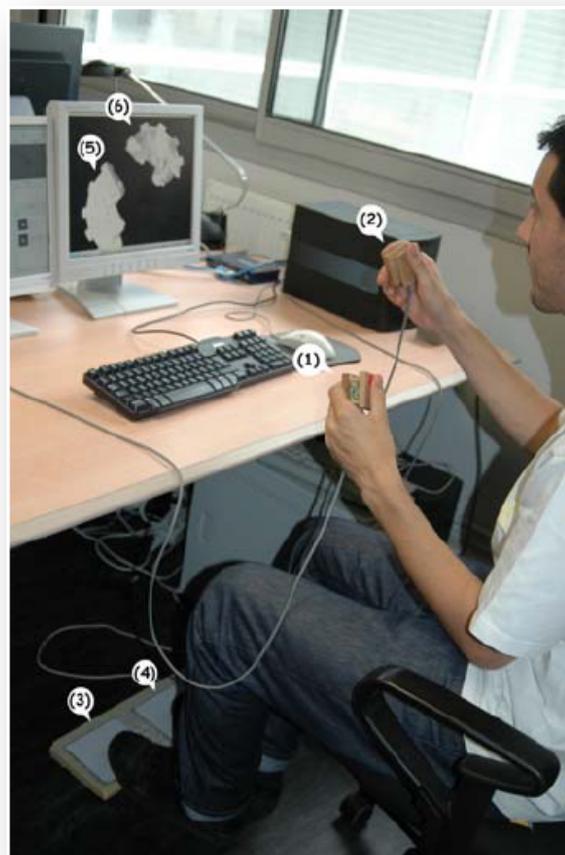
rendre tout simplement possible l'assemblage de fragments archéologiques numérisés en 3D.

Figure 20. Les mêmes fragments numérisés, puis assemblés.



L'idée clé du système ArcheoTUI est d'utiliser deux interacteurs, chacun d'eux ayant à la fois le rôle de représenter physiquement les fragments archéologiques numérisés et le rôle de les contrôler. ArcheoTUI est conçu pour permettre à un utilisateur de faire des hypothèses sur l'assemblage de fragments et de pouvoir changer ces hypothèses aisément, sur le mode du classique *undo/redo*. En effet, le réassemblage des fouilles archéologiques est une longue succession d'essais-erreurs. La [Figure 21](#) présente l'interface utilisateur. Dans chaque main, un interacteur (les items 1 et 2) peut être librement manipulé dans l'espace 3D. A chaque interacteur correspond une pédale (les items 3 et 4). C'est seulement lorsque les pédales sont enfoncées, que les mouvements de translation et de rotation des interacteurs correspondants sont associés à la visualisation sur l'écran des fragments numériques (les items 5 et 6).

Figure 21. L'Interface Tangible ArcheoTUI



Ainsi, les utilisateurs ont une sorte de retour haptique passif lorsqu'ils manipulent les interacteurs. Une fois que la pédale est relâchée, le mouvement de l'interacteur est dissocié de celui du fragment numérique. Ainsi, alors que la position de fragment numérique est fixée, l'utilisateur peut à loisir se remettre dans une position plus confortable. Ce mécanisme d'embrayage avec une pédale unique, a été déjà utilisé par

([Hinckley et al. 1994](#)). Nous avons étendu cette métaphore à deux pédales : la pédale de gauche (respectivement droite) utilisée par le pied gauche (respectivement droit) de l'utilisateur est associée aux actions de la main gauche (respectivement droite) de l'utilisateur. Des pédales pour chaque pied ont été également utilisées par ([Balakrishnan et Hinckley 1999](#)), cependant, à la différence de notre système de pédales, le rôle de chaque pied était différent dans leur travail.

Nous avons conduit deux expérimentations sur le lieu de travail des archéologues chargés de reconstituer des modèles 3D des pièces archéologiques à partir de leurs fragments. Les sujets devaient accomplir des séries de plusieurs assemblages de formes géométriques et de fragments archéologiques. Le détail des protocoles et des analyses sont dans ([Reuter et al. 2007](#)) et dans ([Reuter et al. 2010](#)). Dès la première étude utilisateur il est apparu que l'interface, munie des 2 pédales, était acceptée et que tous les sujets étaient capables de résoudre efficacement des tâches simples d'assemblage. La deuxième étude présentée ci-dessous a confirmé ce résultat et l'acceptation de l'interface.

### 2.2.3. Activation de modalité pour l'assemblage de pièces virtuelles

Publié dans ([Riviere et al. 2010](#)) ; Riviere, G., Couture, N. et Reuter, P. (2010), 'The activation of modality in virtual objects assembly', *Journal on Multimodal User Interfaces (JMUI 2010)* 3(3), 189-196.

Dans une interface tangible dédiée à l'assemblage de pièces virtuelles 3D, l'utilisateur a dans chaque main, un interacteur qui incarne la pièce 3D virtuelle manipulée et les translations et rotations exercées sur l'interacteur sont directement reproduites sur l'objet virtuel correspondant à l'écran. Durant ce processus d'assemblage, l'utilisateur a souvent besoin de repositionner ses mains pour être à l'aise. Dans certaines situations, comme par exemple répondre au téléphone (ou des situations similaires), l'utilisateur doit également poser les interacteurs et dans ce cas le mouvement des pièces virtuelles ne doit plus être associé à ceux-ci. Enfin, selon la taille et la forme des objets virtuels manipulés, les objets physiques peuvent entrer en collision, alors que les objets virtuels ne sont pas eux en collision. L'assemblage en cours doit donc, en quelque sorte, être gelé et l'utilisateur doit alors pouvoir faire ce qu'il veut avec les interacteurs. En conséquence, un système tangible d'assemblage doit fournir une modalité pour autoriser ou non le mouvement des objets virtuels 3D manipulés.

Rappelons la définition récursive d'une modalité ([Nigay et Coutaz 1997](#)).

**Définition.** Soient  $m$  et  $m'$  des modalités,

$$m = \langle d, sr \rangle / \langle m', sr \rangle$$

où  $d$  est un périphérique qui acquiert (périphérique d'entrée) ou qui délivre (périphérique de sortie) une information, et  $sr$  est un système représentationnel.

En terme de modalité, l'interaction tangible pour l'assemblage de pièces virtuelle 3D peut donc être décrite comme la modalité  $m_{va}$ <sup>23</sup> telle que :

$$m_{va} = \langle 2 \text{ interacteurs}, 2 \times 6 \text{ DOF} \rangle$$

<sup>23</sup>  $m_{va}$  pour *virtual assembly modality*

Dans (Riviere et al. 2010), nous avons étudié quelles pouvaient être les différentes définitions de la modalité permettant d'activer/désactiver la modalité  $m_{va}$ . Nous avons appelé cette modalité, la modalité d'« embrayage/débrayage », notée  $m_{cd}$ <sup>24</sup>. L'état débrayé désengage l'association interacteur-pièce virtuelle ; dans l'état embrayé les mouvements des interacteurs sont mis en correspondance avec les objets virtuels.

Différentes solutions existent pour permettre à l'utilisateur d'activer la modalité d'embrayage/débrayage  $m_{cd}$ , bien que ses deux mains soient réquisitionnées et qu'il ne puisse pas laisser tomber les interacteurs pour changer de modalité sans changer les résultats escomptés. Nous nous sommes efforcés d'identifier la meilleure façon de le faire.

Nous avons tout d'abord discuté une possibilité qui est très souvent suggérée par les utilisateurs pour implémenter  $m_{cd}$  permettant d'activer/désactiver la modalité  $m_{va}$ , c'est la modalité vocale. Dans ce cas, on a :

$$m_{cd} = \langle \text{voix, mots} \rangle$$

Bien sûr, la voix peut être utilisée (Bolt 1980), mais dans (Hinckley et al. 1994) il a été montré que la latence induite par le système de reconnaissance vocale est une source de gêne pour l'utilisateur. En prenant en compte les progrès récents et vraisemblablement à venir de la reconnaissance vocale, cet inconvénient pourrait être considéré comme quasiment résolu. Mais, les auteurs ont également mis en avant que le temps pour prononcer la commande est de toute façon trop long. De plus, ils ont mis en évidence l'interférence qui est créée dans ce cas entre la parole et la mémoire court-terme. Contrairement à l'idée communément admise par les utilisateurs, la modalité vocale n'est pas une bonne solution pour implémenter la modalité  $m_{cd}$ .

Nous avons également envisagé la modalité gestuelle. Dans ce cas, on a :

$$m_{cd} = \langle \text{interacteurs, vitesse} \rangle$$

Dans ce cas l'utilisateur peut geler l'assemblage en cessant de bouger les interacteurs. Au delà du problème de précision pour distinguer un mouvement précis d'un non-mouvement pour débrayer, cette solution de bloquer les interacteurs durant une période donnée peut être stressante et irritante pour l'utilisateur (arrêt intempestif du mouvement pour réflexion, ou parce que l'attention est détournée sur autre chose, etc...). Nous avons alors considéré la solution de prendre en compte les gestes d'une partie du corps (tête ou genoux par exemple). Mais dans ce genre de situation l'attention que doit porter l'utilisateur aux mouvements incontrôlés de son corps (pour se délasser, pour se repositionner, etc.) est trop contraignante. C'est pourquoi nous n'avons pas retenu la modalité gestuelle. Il nous est donc apparu qu'il était nécessaire d'ajouter un équipement au système et que nous devons nous intéresser non pas à une « simple » modalité gestuelle mais à un geste combiné à un périphérique spécialisé. Pour cette solution de modalité embarquée, nous avons étudié deux possibilités : des boutons sur les interacteurs (voir Figure 22) ou des pédales (revoir Figure 21 page 48).

<sup>24</sup>  $m_{cd}$  pour *clutching/declutching modality*

Pour ces deux cas, la modalité s'exprime respectivement ainsi :

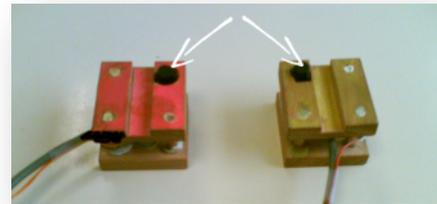
$$m_{cd} = \langle \text{boutons, on/off} \rangle \text{ ou } m_{cd} = \langle \text{pédales, on/off} \rangle$$

L'usage des pédales a été décrit précédemment dans le mémoire, au chapitre 2.2.2 page 47. L'usage des boutons est similaire. C'est seulement lorsque les boutons fixés sur 1 et 2 (cf. [Figure 21](#)) sont enfoncés, que les mouvements de translation et de rotation des interacteurs correspondants sont associés à la visualisation sur l'écran des fragments numériques (les items 5 et 6). Une fois que le bouton est relâché, le mouvement de l'interacteur est dissocié de celui du fragment numérique. Le lecteur pourra se reporter à ([Riviere et al. 2010](#)) pour une discussion fine sur les différents systèmes représentationnels proposés pour chacune des deux solutions : solution avec boutons et solution avec pédales.

La solution à base de boutons semble être a priori plus simple, mais nous avons montré qu'elle a un impact négatif sur l'interaction, en influençant la maniabilité de l'interacteur. De plus, les boutons intégrés sur les interacteurs rompent la métaphore de l'incarnation des pièces virtuelles. En utilisant les pédales, la tangibilité est légèrement écornée aussi (les pédales n'incarnant pas un élément des données manipulées), mais moins qu'avec les boutons. De plus, nous avons montré que l'embrayage est utilisé moins souvent avec les pédales qu'avec les boutons. Ceci est dû à une plus grande liberté dans la manipulation des interacteurs qui a pour conséquence des mouvements d'assemblage plus amples. Lors de l'utilisation des pédales, les utilisateurs ont montré des gestes proches des gestes réalisés dans un processus réel d'assemblage d'éléments physiques.

Nous avons conclu que  $m_{cd} = \langle \text{pédales, on/off} \rangle$  était la meilleure modalité d'activation de la modalité  $m_{va}$ .

Figure 22. Solution avec boutons embarqués sur les interacteurs



## 2.3. Perspectives pour l'assemblage tangible de pièces virtuelles 3D

### 2.3.1. Contexte : projet ANR SeARCH

ArcheoTUI, nous l'avons vu, s'appuie sur les concepts de l'interaction bi-manuelle et permet une interaction efficace pour manipuler les fragments archéologiques. Cependant, dans certains cas, des techniques de mise en correspondance automatique sont possibles (voir comme point de départ les références de l'article ([Huang et al. 2006](#))). Il est donc intéressant de pouvoir offrir à l'archéologue un système permettant de combiner un assemblage purement manuel avec un assemblage automatique. C'est l'objet du projet ANR SeARCH (2009-2012). SeARCH<sup>25</sup>, pour *Semi-automatique*

<sup>25</sup> <http://anr-search.labri.fr/>

*Acquisition and Reconstruction of Cultural Heritage*, associe l'INRIA-IPARLA (coordinateur), Ausonius (CNRS - Université de Bordeaux), le CEAlex (CNRS, Alexandrie, Egypte) et l'ESTIA (Bidart, France). Il est donc construit sur la collaboration entre informaticiens et experts du patrimoine tant il est vrai que l'informatique et la préservation numérique peuvent être au service du patrimoine. Ce projet est de plus motivé par un contexte archéologique bien déterminé : la reconstruction partielle du phare d'Alexandrie et de ses statues environnantes. L'usage conjoint d'un scanner 3D et d'un réassemblage virtuel des objets correspondants se propose d'être la solution pour mieux les étudier, les analyser, les reconnaître, les préserver et les stocker ; surtout que les fragments du phare sont abîmés par l'érosion, l'usure du temps et les différents impacts subis, ou sont complètement manquants. Ainsi, le projet SeARCH a pour but de développer des techniques semi-automatiques alliant l'acquisition digitale directement sur le site archéologique et le réassemblage des fragments aussi automatique que possible, prenant en compte l'expérience des professionnels du patrimoine à l'aide des techniques d'interaction tangibles.

Deux pistes de travail sont prévues en ce qui concerne l'Interaction Tangible. L'une, concernant l'assemblage 3D virtuel, elle est présentée ci-dessous ; l'autre, toujours dans le champ de l'interaction tangible à petits grains, concerne la déformation de pièces virtuelle 3D et sera présentée dans la partie « Conclusion » page 81.

### 2.3.2. Mise en position relative et collisions

---

Nous comptons mixer les résultats obtenus avec l'interface tangible ESKUA et l'interface tangible ArcheoTUI. Nous adapterons les algorithmes de mise en position relative et de collision des pièces numériques pour rendre l'interaction utile et précise en fonction des mouvements que l'utilisateur fait avec les interfaces tangibles. Nous avons prévu d'explorer :

- les algorithmes basés sur des calculs logarithmiques des distances entre objets,
- et les algorithmes basés sur les champs d'influence d'un solide sur un autre solide par l'utilisation des équations classiques de la physique et de comparer les résultats obtenus.

Des prototypes seront réalisés et évalués par des tests utilisateurs pour déterminer les performances pour le pilotage d'une simulation de déformation et pour l'assemblage.

En termes d'évaluation, nous envisageons de travailler sur le naos pour valider la possibilité de faire une nouvelle fois un travail de réassemblage, mais cette fois ci à partir d'une interaction tangible.

*« Le naos est presque complet mais complètement immergé.  
Aujourd'hui la restitution est approximative. »  
Isabelle Hairy, CEAlex (2009)*

Au niveau de la méthode, nous souhaitons partir des dessins des pièces qui existent (ceux d'Isabelle Hairy), de faire les modèles CAO 3D de ces pièces à partir desquelles une nouvelle restitution sera faite et que nous comparerons à l'existante.

Ce travail, en terme de contribution, tout en continuant d'explorer la problématique générale de l'assemblage de pièces virtuelles en utilisant des Interfaces Tangibles intégrera l'aspect semi-automatique. Au niveau de la démarche théorique, l'objectif est d'implémenter l'imbrication des deux boucles d'interaction d'Ishii (cf. page 30). Un travail d'appropriation de la notion de « communication *user-process* » sur laquelle travaille un des partenaires du projet SeARCH (Xavier Granier) sera faite pour explorer les liens entre cette notion et l'interaction tangible.



## CHAPITRE 3. Interaction Tangible multi-surfaces

### 3.1. Contexte

Étudier l'interaction tangible dans le but de réduire la distance cognitive induite par l'usage d'une interface en plaçant l'utilisateur dans des « conditions spontanées de travail » (selon S. Safin) conduit naturellement à vouloir travailler sur une table. Les cas d'études et prototypes présentés précédemment, ESKUA et ArcheoTUI, sont d'ailleurs associés à l'utilisation d'une table (le bureau de l'archéologue et le bureau du concepteur). Bien que la table ne participe pas directement à l'interaction, elle en est le support et elle place le contexte de l'interaction. C'est ([Wellner 1993](#)) qui a eu la vision avec son Digital Desk de la possibilité d'interagir avec le monde virtuel sur table, en proposant une surface interactive sur lequel l'utilisateur pouvait interagir avec des objets du monde réel (tangible) et avec les doigts (tactile). La table interactive permet de fusionner espace d'action et espace de perception ([Norman 1988](#)) en mélangeant l'interaction avec des objets numériques affichés par vidéo-projection et des objets physiques. Les travaux sur la *MagicTable* ([Bérard 2003](#)) sont précurseurs en France sur ce sujet, ainsi que ceux plus conceptuels introduisant la notion de multi-surfaces interactives ([Coutaz et al. 2003](#)), plaçant clairement l'interaction sur table dans le cadre de l'interaction ubiquitaire. Le domaine des tables interactives a connu un essor important suite aux travaux de ([Han 2005](#)) sur la technologie du multi-point (*multi-touch*) et sa table *FTIR*<sup>26</sup>. Reconnaissance du domaine confirmée par la création en 2006 de la conférence internationale *Tabletop* devenu depuis ITS (*conference on Interactive Tabletops and Surfaces*).

### 3.2. Contributions

#### 3.2.1. Validation d'hypothèses de modèle 3D de sous-sol par des coupes 2D : GeoTUI

Publié dans ([Riviere et al. 2009](#)) ; Riviere, G., Couture, N. et Jurado, F. (2009), 'Tangible User Interfaces for geosciences', SEG Technical Program Expanded Abstracts 28(1), 1137-1141. SEG.

Il y a peu de travaux relatifs à des applications sur tables interactives appliqués au domaine de l'ingénierie du pétrole. ([Ishii et al. 2004](#)) ont proposé une interface permettant de sculpter des surfaces géologiques. Et, récemment, une application nommée *Petrotrek*<sup>27</sup> a été réalisée sur la Microsoft Surface. Elle permet de contrôler des plans relatifs à la production/extraction de pétrole.

Pourtant, il existe un réel besoin d'une interaction POST-WIMP (cf. Introduction de ce mémoire). En effet, les géophysiciens doivent apporter divers éléments de réponse avant que ne soit décidée l'implantation d'un puits pétrolier. Notamment ils doivent pouvoir localiser une poche de pétrole et spécifier l'emplacement optimal du forage qui permettra d'exploiter la plus grande quantité de pétrole possible. Pour ce faire les géophysiciens ont besoin de connaître la composition exacte du sous-sol, et de pouvoir

<sup>26</sup> FTIR pour *Frustrated Total Internal Reflection*

<sup>27</sup> The Information Store and Infusion Development: *Petrotrek* for the Microsoft Surface on [www.istore.com/Surface.html](http://www.istore.com/Surface.html).

étudier, par exemple, les pressions qui s'exercent. Un modèle (au sens mathématique) de sous-sol doit donc être élaboré. Un modèle préliminaire, sous la forme d'un nuage de points, est d'abord obtenu par acquisition sismique. Géologues et géophysiciens interprètent ce modèle brut et tirent des hypothèses sur la nature des roches, jusqu'à obtenir un modèle mathématique le plus proche possible de la réalité. Des coupes 2D dans le modèle 3D sont successivement réalisées pour comprendre et modifier le modèle. Ces différentes tâches sont classiquement réalisées à l'aide de l'informatique via des interfaces graphiques (GUI). Nombre de géophysiciens pourtant compétents rencontrent des difficultés pour réaliser ce modèle mathématique avec les GUI. En effet, les réflexions géophysiques mobilisent énormément les ressources mentales du spécialiste et requièrent une forte concentration. Les outils actuels (menus déroulant, zone de texte, cases à cocher) demandent beaucoup d'attention et éloignent le géophysicien de ses réflexions. La nécessité de collaborer entre géophysiciens et géologues pour obtenir un modèle exact rajoute des contraintes sur le type d'interaction à proposer. L'enjeu est double : simplifier l'interaction, et faciliter le travail en collaboration co-présente.

On note de la part des géophysiciens et des géologues une réelle volonté de changer les modes d'interactions avec leurs simulateurs pour augmenter leurs rentabilités. La réalité virtuelle est porteuse de point d'amélioration en particulier dans sa dimension collaborative avec les salles immersives. Les grands instituts et organismes ont aménagé ces types de salles pour optimiser les conditions de travail. Mais, aujourd'hui, ces salles sont très peu utilisées. Le coût important du dispositif et la place qu'il requiert (une très grande salle dédiée à un seul usage) ne permettent pas d'en posséder plus d'un exemplaire. Les utilisateurs doivent donc se conformer à un planning de réservation. Les téraoctets de données qui sont manipulés doivent être transférés et la plupart du temps traduits en un autre format que celui utilisé sur les postes de travail. Quant aux casques, ils ne sont parfois pas supportés. Ils ne favorisent pas la concentration et empêchent toute communication interpersonnelle. L'immersion totale ne s'impose donc pas comme une solution satisfaisante pour un travail quotidien. Une solution, envisagée par le groupe TOTAL, propose un "mur d'écrans" et une interaction avec le doigt. Elle permet de visualiser à l'échelle 1 une coupe. On obtient ainsi une grande précision, mais cette technologie ne favorise pas les interactions simultanées de plusieurs personnes et oblige à une station debout. L'interaction à plusieurs personnes (2 à 4 géologues et géophysiciens) avec les logiciels de visualisations et les calculateurs existants de géologie et de géophysique nous paraît plus ergonomique et adaptée aux conditions de travail quotidiennes avec une table interactive sur laquelle on déplace des interacteurs tangibles.

Dans GeoTUI, les interacteurs tangibles manipulés peuvent être une règle ou des palets, pour situer une coupe et pour manipuler des points de contrôle. Le travail en équipe peut être amélioré par cette approche, où l'usage d'une interaction multimodale et d'une interface tangible lors de réunions de travail permet une interactivité entre les utilisateurs. Interactivité d'autant plus forte que les données peuvent être manipulées à plusieurs autour d'une table. GeoTUI propose donc un espace de travail qui se rapproche des conditions de travail connues par les géophysiciens dans les bureaux d'études. La surface de la table devient ainsi un espace d'échange privilégié, où les

utilisateurs peuvent partager une carte géographique et un tracé sismique. La carte géographique est affichée à la surface de la table à l'aide d'un vidéoprojecteur, et le système informatique peut connaître la position des interacteurs (règle, palets) en utilisant une caméra. Nous proposons ainsi une informatique présente, mais non intrusive, qui observe l'espace de travail de l'utilisateur. Espace d'action et espace de perception se rejoignent sur la table, satisfaisant en cela le principe de (Norman 1999).

**Figure 23. GeoTUI pendant une expérimentation à l'IFP Energie Nouvelle : trépied, caméra, pavé numérique, palet, etc.**



Le prototype de GeoTUI, photographié [Figure 23](#), est équipé d'une caméra ieee1394 Sony XC-555P et d'un vidéoprojecteur EPSON EMP 7200. Ces deux dispositifs sont fixés en hauteur sur un trépied SHOWTEC 70128 Alu Stand double T-bar à élévation variable. Le tout se range dans un carton (20x20x1,50 cm) et une valise (50x75x30cm). Pour faire fonctionner l'interface, une table ou un bureau est requis. La seule contrainte concerne la surface du meuble utilisé : elle ne doit pas comporter de dessins de nœud de bois trop contrastés, ni présenter un aspect trop sombre, afin de ne pas perturber la vision de l'utilisateur. Les interacteurs proposés sont : une règle de 30 cm., des palets ronds de 35 mm. de diamètre, un boîtier de validation muni de 4 boutons physiques, un pour valider la coupe sélectionnée et obtenir un plan de coupe, un pour revenir à la carte, un pour effacer les 5

dernières<sup>28</sup> traces de coupe sur la carte et un pour accrocher/décrocher un palet à un tracé de coupe. L'interface utilisateur GeoTUI, communique via socket avec l'application JOHN (Jerry On tHe Net) développée par IFP Energies nouvelles ([Jurado et al. 1996](#)).

Nous avons mené deux campagnes de tests échelonnées sur 1 an. Les deux fois, le prototype GeoTUI a été transporté depuis notre laboratoire jusqu'à l'IFP Energies nouvelles, afin de mener des tests utilisateurs sur le lieu de travail des géophysiciens.

La première expérimentation était exploratoire. Elle nous a permis de confirmer la supériorité des interfaces tangibles sur une table interactive par rapport à une interface type GUI pour des séries d'exercices métiers. Ce qui n'est pas surprenant compte tenu du résultat bien connu du bénéfice pour la réalisation d'une tâche d'une manipulation directe par rapport à une manipulation indirecte. Elle nous a également permis de convaincre notre partenaire métier et les géophysiciens, sur qui nous appuyons nos expérimentations, de l'intérêt d'un système de type table interactive. Cette première expérimentation a également montré (pour 100 % des 10 sujets) l'intuitivité du choix de la règle pour faire des coupes de sous-sol à partir d'une carte projetée sur la table.

La seconde expérimentation, avec 12 sujets, avait pour but de qualifier les différents modes d'interaction pour réaliser une ligne de coupe : la souris sur l'écran, 1 palet, 2 palets et une règle sur la table. Le mode de validation était un bouton réel sur un boîtier

<sup>28</sup> Le chiffre 5 est arbitraire et est issue de discussions avec les géophysiciens.

posé sur la table. Pour les deux exercices (table 1), la règle est apparue légèrement supérieure aux 2 palets et très supérieure à 1-palet et à la souris (se reporter à la discussion paragraphe 1.2.4 page 38).

En conclusion, GeoTUI est un prototype de table d'interaction multimodale (Couture et Riviere 2006) (équipée d'outils, de règles qui sont autant de TUI) pour l'aide aux géophysiciens chargés de reconstituer un modèle tridimensionnel du sous-sol profond sur la base de l'interprétation de données sismiques. GeoTUI combine les avantages liés à un espace de travail traditionnel, cartes en papiers, crayons, règles, avec la puissance de simulation des logiciels de géologie. GeoTUI illustre l'intérêt des tables interactives pour le domaine des Géosciences. Il a permis également une expérimentation de nouvelles formes d'interactions tangibles et de montrer que les interacteurs proposés sont adaptés au contrôle de la donnée. Il a été démontré par des expérimentations qu'une table interactive intégrant une interface tangible est appropriée et est efficace. Un gain en temps et surtout en fiabilité est constaté par rapport aux GUI. Ensuite, pour le développement des tables interactives, GeoTUI est une illustration de manipulation de données 3D sur une table interactive par le biais d'interface tangible. Enfin, le principe de conception et de réalisation de GeoTUI qui est un système démontable, portable et à faible coût peut être repris pour des systèmes souhaitant un prototypage rapide en vue de tester et d'expérimenter des paradigmes d'interaction en situation écologique.

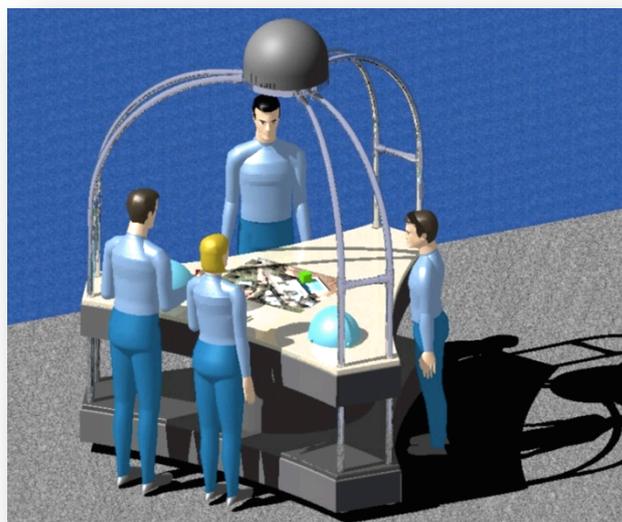
### 3.2.2. Conception d'une Table Tangible favorisant l'acte d'achat : Tribal Tabletop

Publié dans (Riviere et Couture 2008) ; Riviere, G. et Couture, N. (2008), The Design of a Tribal Tabletop, in 'Tabletop '08: Proceedings of the Third IEEE International Workshop on Horizontal Interactive Human-Computer Systems', IEEE Computer Society, Amsterdam Pays-Bas, pp. 29-30. extended abstract and poster.

De notre point de vue, la configuration des surfaces interactives doit être étudiée en fonction de l'activité pratiquée. Étudier la forme physique de la table fait notamment partie des recommandations de (Wallace et Scott 2008). L'intégration de l'informatique induit de nouvelles contraintes de configuration (accessibilité, visibilité) ou crée de nouvelles situations de travail qui n'existaient pas avant l'informatique. C'est ce que nous avons étudié et expérimenté dans (Riviere et Couture 2008) où la forme de la table a été étudiée pour la construction d'une simulation

3D dans le contexte d'une vente en boutique ou dans un salon d'exposition où les

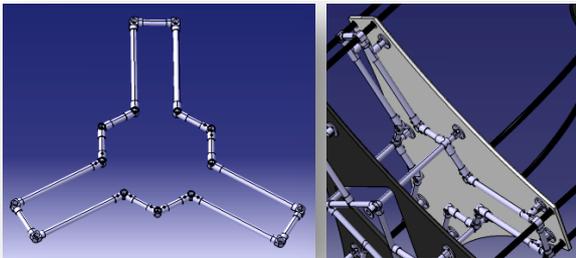
Figure 24. Tribal tabletop en situation (réalisé sous Catia v5)



participants ont des rôles différents : le vendeur et les clients, accompagnés de leurs enfants ou de leurs amis. La table n'engendre alors pas de face à face (comme les tables rectangulaires), ni de situations de promiscuité (comme les tables rondes).

Au cours de ces dernières années, les stratégies de marketing des entreprises intègrent l'utilisation des nouvelles technologies comme outil de marketing pour accroître les ventes. Les progrès réalisés dans les nouvelles interfaces utilisateur permettent aujourd'hui la diffusion des simulations 3D comme outil de marketing dans les magasins. L'objectif est d'aider le client à s'imaginer, de la manière la plus réaliste possible, avec le produit dans l'avenir et ainsi de le convaincre plus facilement. Nous nous sommes concentrés sur une vente particulière, la vente de piscines. La décision d'acheter un tel type de produit est rarement impulsive. La société qui fabrique le produit doit arriver à convaincre le client sur le long terme. Ce type de produit est toujours vendu avec les conditions de contact, dans un magasin dédié.

Figure 25. Modèle CAO du squelette avec ses fixations sous la table (Catia v5)



Dans ce type de vente, sept phases sont généralement appliquées ([Moncrief et Marshall 2004](#)); nous nous sommes appuyés sur ces phases pour concevoir une table dédiée à l'acte d'achat. C'est une table à trois branches, qui évoque une forme étoilée que nous avons appelée « forme Tribale », voir [Figure 24](#). Dans ([Riviere et Couture 2008](#)), nous l'avons comparée à d'autres formes de table et décrit précisément sa conception, à titre d'illustration voir [Figure 25](#).

### 3.2.3. Amélioration de l'interaction directe entre concepteurs pour la revue de projets

Publié dans ([Merlo et Couture 2010](#)); Merlo, C. et Couture, N. (2010), A tabletop-based collaborative environment to enhance direct interactions between designers, in I. Horváth, F. Mandorli et Z. Rusák, eds, 'Proceedings of TMCE 2010 Symposium', pp. 447-460.

La collaboration co-localisée pose de nombreux défis et il est aujourd'hui reconnu que les interfaces écran-souris-clavier sont mal adaptées à ce type de situation. Or les systèmes de tables interactives, qui proposent un nouveau paradigme pour outiller les activités collaboratives, deviennent de plus en plus disponibles et abordables au fur et à mesure que les offres commerciales se multiplient (quelques exemples de fournisseurs : Microsoft, Circle Twelve, IntuiLab, Immersion, Mucho-Media, Nuiteq). Le contexte de la revue de projet est un champ idéal d'investigation de ces notions de collaboration et d'interaction directe entre concepteurs. Dans le développement de produits, la collaboration entre les membres de l'équipe est un facteur clé pour la réussite des projets de conception de produits et l'innovation. La plupart du temps, les situations de

collaboration s'appuient sur des outils traditionnels. Notre objectif dans (Merlo et Couture 2010) a été de renforcer les échanges entre les utilisateurs en leur offrant des interactions directes avec les données 3D manipulées. Ainsi nous avons développé un prototype opérationnel pour étudier deux tâches manipulatoires : la manipulation d'un objet 2D, en particulier l'annotation (Figure 26) et la manipulation d'une pièce CAO selon les 3 dimensions (Figure 27).

Figure 26. Stylet pour l'annotation.

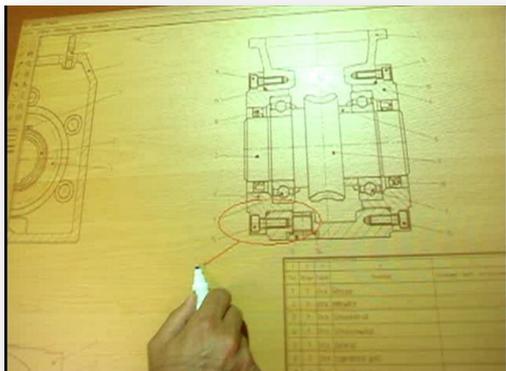


Figure 27. Combinaison du stylet et de la Wiimote pour l'exploration d'un modèle 3D.



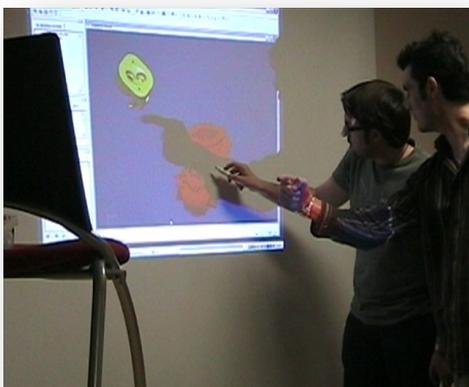
Le prototype propose deux types de visualisation : sur une table (Figure 29) ou au mur (Figure 28) selon les situations de travail.

Le logiciel métier utilisé et interfacé est ProductView de la société PTC, logiciel dédié à la maquette numérique (*digital mock-up (DMU)*). Les fonctions utilisées sont : rotations d'assemblages et de pièces en 3D, translations d'assemblages et de pièces en 3D, masquage de certaines pièces, coupes dynamiques (en fonction du déplacement d'un curseur). Nous

Figure 29. Configuration sur table



Figure 28. Configuration sur le mur.

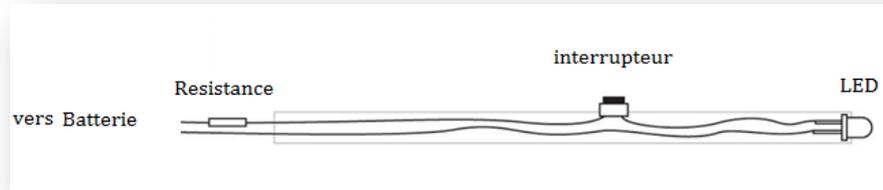


avons rajouté les fonctions suivantes : zoom et dé-zoom, sélection de pièces, coupe dynamique et sélection de fonctions par le biais d'un panneau de choix de fonctions, intégré au logiciel ProductView.

Nous avons conçu pour l'interaction collaborative, des stylets inspirés des

manettes de la console Wii<sup>29</sup>. Les stylets font office d'émetteur infrarouge, une LED et une batterie sont nécessaires. Un interrupteur permettant d'allumer ou d'éteindre la LED est intégré au stylet ([Figure 30](#)).

Figure 30. Schéma de conception du stylet



### 3.3. Perspectives pour l'interaction tangible multi-surface

#### 3.3.1. GeoTUI 2.0

D'un point de vue du métier des géosciences bien des points restent à travailler pour fournir une interface opérationnelle et industrialisable. Il est intéressant de les noter car ils revêtent, à notre sens, une portée plus large que ce domaine d'application et constituent des champs d'investigation pour le développement des tables interactives en général. En particulier, une étude poussée devrait être menée sur la précision d'affichage du système. Il conviendrait alors de mettre en regard le besoin de précision nécessaire pour le géophysicien et les possibilités du système liées aux matériels et aux techniques disponibles. Il serait aussi utile d'intégrer les techniques de visualisation d'information à la vision et à l'interaction sur une table pour favoriser une meilleure compréhension des informations disponibles et ainsi optimiser la réalisation de la tâche. Nous nous sommes concentrés sur la tâche de coupe mais il faudrait compléter ce travail par des études des autres tâches que nous avons identifiées : éditer une interprétation d'une horizon (au sens géophysique) ; attribuer des paramètres physiques aux couches ; faire des simulations dans les réservoirs de type forage, pression et production. Il s'agirait, enfin, de collaborer avec l'IFP Energies nouvelles, pour proposer une version "professionnelle" basée en particulier sur une caméra infrarouge et avec des interacteurs adaptés pour l'action de pointage. A cet effet, un procédé s'appuyant sur des standards serait souhaitable. Le pôle de compétitivité AVENIA sera, nous l'espérons, une opportunité pour cadrer et favoriser un projet de collaboration de ce type avec l'IFP Energies nouvelles.

#### 3.3.2. Intégration de l'interaction tangible et tactile

L'ensemble des travaux sur les tables interactives qui ont été présentés dans ce mémoire concerne l'interaction tangible. Or, l'ensemble des tables interactives du marché sont tactiles et les utilisateurs sont de plus en plus habitués aux technologies tactiles (grâce notamment à l'iPhone d'Apple). Il semble indispensable de coupler ces deux paradigmes d'interaction. Dans cette perspective, la propriété 3 des TUIs proposée par Ullmer et Ishii (vu en 1.1.3 page 29) qui souligne l'importance du couplage perceptuel entre les représentations tangibles et intangibles, devrait s'en trouver

<sup>29</sup> Réalisés par des étudiants de l'ESTIA et du E1.CESI partant des travaux de Johnny Chung Lee, <http://johnnylee.net/>

nettement améliorée. La continuité spatiale des représentations tangibles et intangibles est une condition essentielle pour améliorer la perception de ce couplage. Et une intégration du tactile et du tangible semble aller dans ce sens.

Nous avons à des fins d'exploration de ces concepts réalisé dans le cadre d'un projet réalisé par les élèves ingénieurs de l'ESTIA une table tactile, photographiée [Figure 31](#), suivant la technologie *Diffuse Illumination*.

Dans ce travail d'intégration nous comptons utiliser le protocole TUIO [Kaltenbrunner 2005] qui a été conçu pour les tables interactives et les interfaces tangibles. Il est parfaitement adapté et propose un haut niveau d'abstraction devant permettre des développements efficaces. De plus nous nous appuyerons sur la notion de multi-surface d'interaction ([Coutaz et al. 2003](#)) qui propose un paradigme unificateur pour raisonner sur plusieurs styles d'interaction à la fois (GUIs, TUIS, Surface Interactive). Curieusement, à notre connaissance, hormis le travail de ([Wellner 1993](#)) (en partie en magicien d'Oz) il n'existe pas de travaux proposant un démonstrateur opérationnel s'attachant à modéliser une interaction mêlant intimement interaction tangible et tactile.

**Figure 31. Table Tactile (technologie DI) réalisée par les élèves ingénieurs de l'ESTIA**



## CHAPITRE 4. Interaction Tangible avec tout le corps

Nous abordons dans ce chapitre les travaux menés dans le cadre de l'Interaction Tangible à gros grains. Elle 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 grands espaces, de fait, l'utilisateur du système doit bouger parmi et autour de ces objets avec tout son corps. La technologie est alors embarquée « dans » le corps, dans les vêtements, les rendant d'une certaine façon tangible. Pour aborder ce champ de recherche, il faut en premier lieu s'intéresser au mouvement du corps, à la posture, bref à la capture du geste. Geste qui permettra de générer l'interaction entre l'utilisateur et le système.

### 4.1. Le mouvement du corps, la capture du geste

De nombreux auteurs, venant de champs de recherche variés, se sont intéressés aux mouvements du corps en général. Pour notre part, nous avons dans le cadre de la thèse de (Clay 2009) circonscrit notre étude aux travaux qui permettent de travailler sur la capture du geste, le geste étant un mouvement particulier d'une certaine partie du corps opérant dans les trois dimensions. Selon (Kendon 2004), le geste est défini comme une action visible à intention de communication. Il propose une segmentation du geste en unités de gestuelle. Une unité de gestuelle dure d'une pause à une autre pause et est séparée en différentes phases. La première phase est celle de préparation. Elle vient avant la phase d'action. C'est pendant la phase d'action que l'expressivité du mouvement est à son maximum. C'est cette phase qui nous permettra, dans le cadre de la conception d'un système interactif tangible sensible au geste, de définir avec le plus de justesse la réaction de système à déclencher. Les gestes sont eux-mêmes catégorisés. Par exemple dans (Ekman et Friesen 1969), une taxonomie en cinq catégories est proposée : les emblèmes, gestes se substituant à un mot ou une phrase, comme le V de victoire ; les illustreurs, illustrant le discours, comme le fait de pointer en donnant des directions ; les régulateurs, permettant l'interaction du discours ; les démonstrations affectives ; et enfin les adaptateurs, gestes n'appuyant pas le discours (comme fumer une cigarette). Selon si l'on souhaite prendre en compte le contexte, ou pas, dans l'interprétation que l'on fait du geste, on choisira telle ou telle catégorie. Il en sera de même si l'on s'intéresse aux gestes dans le cadre d'une interaction actée ou non actée. Bref, selon la finalité recherchée ceux sont différentes catégories qui seront considérées et des paramètres très divers qui seront observés.

Les cas que nous venons de citer reposent sur une observation objective du geste. Il existe une autre approche, dite fonctionnelle, qui se base, elle, sur les fonctions du geste dans un contexte particulier d'interaction et de communication. Par exemple, (Scherer et Wallbott 1985), catégorisent, selon leurs fonctions, les expressions non-verbales et non limitées à la gestuelle en situation de conversation. Ou encore, dans (Kendon et Language 1988) la question de savoir « comment les gestes peuvent-ils devenir des mots ? » est posée. Pour y répondre Kendon propose une taxonomie fonctionnelle du geste sous la forme d'un continuum. La première catégorie est la gesticulation. Ce sont des mouvements spontanés des mains et des bras qui accompagnent le discours. Viennent ensuite les "para-langages". Ceux-ci ne sont pas réellement des langages, mais plutôt des systèmes de codage (par exemple pour l'arbitrage de certains sports). Les pantomimes visent à représenter, par la gestuelle, un objet, un événement, ou un état

d'esprit. Les emblèmes sont, tout comme la catégorie du même nom d'Ekman, des gestes symboliques se substituant à un mot ou une phrase. Enfin, les langages de signes se réfèrent aux véritables langages (comme la langue des signes française).

Sur le plan technologique, il y a deux solutions pour capter la posture du corps et les gestes effectués : les capteurs d'orientation et le traitement de l'image. Pour ce qui est du traitement de l'image, dans la plupart des cas, il s'agit d'analyser et d'interpréter le mouvement humain à partir d'un flux vidéo. Ces techniques sophistiquées s'appuient sur des algorithmes mathématiques. Il existe une littérature très vaste, citons simplement et à titre d'exemples, des travaux originaux qui font appel à des calculs d'énergie de déformations élastiques appliqués aux gestes faits par le doigt (Vatavu et al. 2009) ou encore les approches qui s'inspirent du fonctionnement du système visuel humain dans le but de développer des algorithmes de traitement d'image bio-inspirés (Benoit et al. 2007). Nous avons pour notre part travaillé avec des solutions à base de capteurs. Plus précisément les travaux présentés dans la suite ont utilisé les capteurs 6DOF Liberty (Polhemus) et la combinaison de capture de mouvement MVN (Xsens). G. Domenger sur la photographie [Figure 7](#) page 21 porte la combinaison MVN.

## 4.2. Contributions

### 4.2.1. Cadre de conception : une architecture logicielle unificatrice

Publié dans (Clay, Couture et Nigay 2009) ; Clay, A., Couture, N. et Nigay, L. (2009), Engineering affective computing: a unifying software architecture, in 'ACII '09: Affective Computing and Intelligent Interaction', IEEE, Amsterdam Pays-Bas, pp. 1-6.

Le travail présenté dans cette section a été initié dans le but de proposer un modèle d'architecture basé composants pour la reconnaissance des émotions par ordinateur. Ce modèle, et notamment ses différents types de composants, est cependant généralisable pour d'autres types d'analyse et peut être exploité pour tout système de capture de mouvement influençant l'exécution d'un système interactif tangible. Au niveau de la conception de l'architecture implémentationnelle, chaque composant est une entité indépendante regroupant un corps fonctionnel et une interface graphique. Cette architecture fonctionnelle se présente donc sous la forme d'une hiérarchie de composants, ce qui permet à la fois le regroupement des différents *widgets*<sup>30</sup> et le choix, à l'exécution, des composants à utiliser. Du point de vue de l'interface, le système permet l'intégration directe des *widgets* graphiques de nouveaux composants à ajouter.

L'architecture est conçue selon une décomposition classique en trois niveaux remplissant chacun une fonction déterminée : les niveaux Capture, Analyse et Interprétation. Au niveau Capture, l'information est captée du monde réel et en particulier de l'utilisateur grâce à des dispositifs, par exemple caméra, capteurs ou microphone. Cette information est ensuite analysée dans le niveau Analyse, où les caractéristiques pertinentes sont extraites des données capturées. Enfin, les caractéristiques extraites sont interprétées pour répondre au besoin fonctionnel de

<sup>30</sup> Widget, à prendre dans le sens d'un composant d'interface graphique.

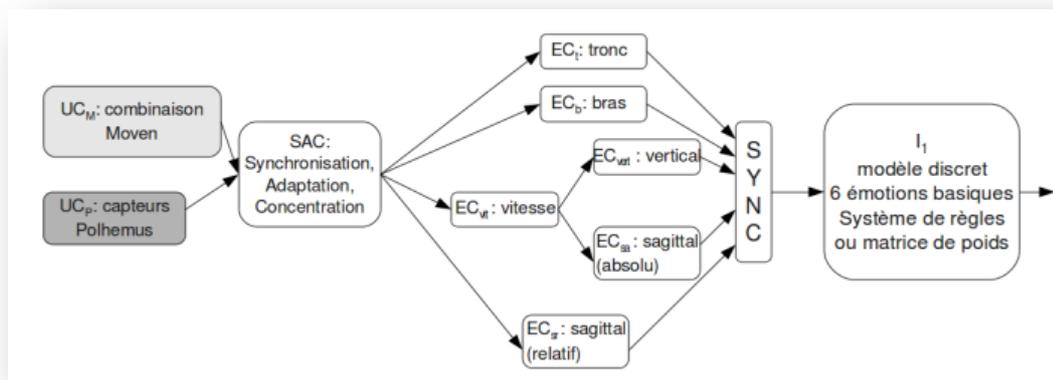
l'application (au niveau métier). Ce découpage en trois niveaux, Capture, Analyse et Interprétation, forme un motif fonctionnel sur lequel nous nous appuyons pour développer notre modèle.

Notre modèle d'architecture propose cinq types de composants, sachant que chaque composant s'abonne et émet un ou plusieurs flux de données :

- 4.2.1. **L'unité de capture** a pour rôle de faire l'interface avec un dispositif physique de capture des données.
- 4.2.2. **L'extracteur de caractéristiques** analyse les données qui lui sont fournies en entrée pour en extraire une ou plusieurs caractéristiques pertinentes.
- 4.2.3. **Un interpréteur** reçoit les valeurs de plusieurs caractéristiques. Son rôle est de les interpréter<sup>31</sup> selon le besoin du logiciel à concevoir.
- 4.2.4. **L'adaptateur** a pour rôle de modifier un flux de données. Il peut s'agir d'une simple modification de format comme d'un traitement lourd sans rapport avec la reconnaissance (suivi 3D par caméra par exemple).
- 4.2.5. **Le concentrateur** a pour rôle d'amalgamer plusieurs flux de données selon une stratégie *ad hoc*.

Il est à noter que le style à composants sur lequel s'appuie notre modèle permet d'avoir un modèle ouvert, extensible, modifiable et réutilisable. Construire une application revient à assembler les composants en les faisant s'abonner aux flux de données d'autres composants. La [Figure 32](#) présente un exemple d'assemblage. Cette approche permet également, en enchaînant les composants de type "extracteur de caractéristiques", d'extraire des caractéristiques de haut niveau se reposant sur des caractéristiques de bas niveau. Par exemple, un extracteur peut calculer les points d'intérêts du visage et fournir ces points extraits à un autre extracteur, qui grâce à une mémoire tampon calculera les déplacements de ces points d'intérêt.

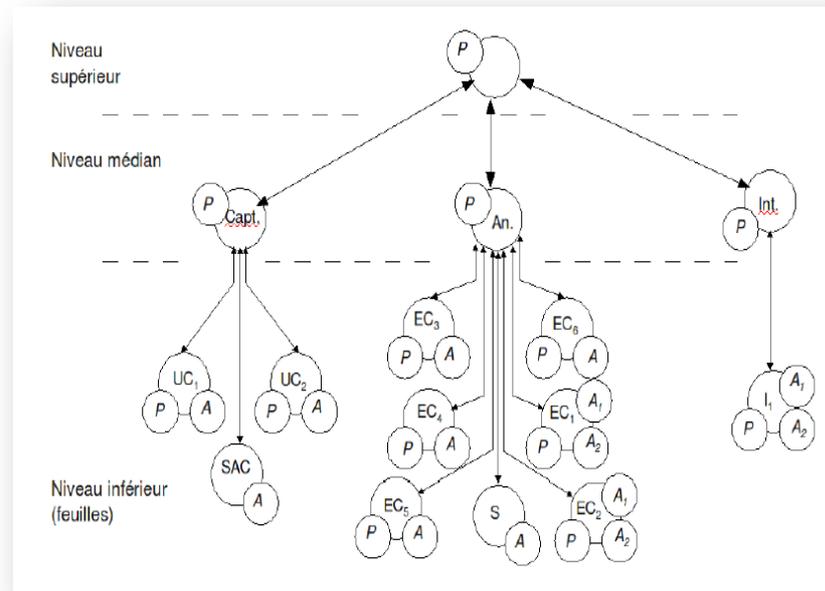
Figure 32. Un exemple d'assemblage des composants.



<sup>31</sup> Dans (Clay 2009) nous avons réalisé un interpréteur dédié à la reconnaissance d'émotion (cf. partie 4.2.2). Dans ce cas précis, l'interprétation est soumise au modèle des émotions considéré (modèle discret, continu, ou componentiel), ainsi qu'à l'algorithme informatique utilisé (e.g., réseau de neurones).

Le modèle PAC (Coutaz 1987), initialement dédié aux systèmes interactifs, s'applique ici en permettant de paramétrer le canevas logiciel bâti sur notre modèle d'architecture. En effet, quel que soit son niveau fonctionnel - Capture, Analyse ou Interprétation, un agent PAC est créé par composant. Le modèle PAC (Présentation, Abstraction, Contrôle) est un modèle d'architecture en IHM basé sur des agents comportant trois facettes : la facette Présentation (P), la facette Abstraction (A), et la facette Contrôle (C). Un agent PAC est à la fois un système interactif et un constituant du système interactif. La facette Présentation prend en charge l'interaction avec l'utilisateur en entrée et sortie. La facette Abstraction est le noyau fonctionnel du composant, comprenant ses différentes fonctionnalités. Enfin, la facette Contrôle permet le dialogue entre les facettes Présentation et Abstraction. Le dialogue, entre des agents PAC pères et fils, passe également par l'intermédiaire de leur facette Contrôle respective. Les agents PAC sont organisés sous la forme d'une hiérarchie illustrée Figure 33. La facette Abstraction de l'agent est le noyau fonctionnel du composant tandis que la facette Présentation définit l'interface graphique qui permet au concepteur de paramétrer le composant.

Figure 33. Hiérarchie en agents PAC de l'application eMotion présentée dans le paragraphe suivant.



Outre ces agents feuilles de la hiérarchie, nous avons créé un agent PAC par niveau fonctionnel. Ces trois agents médians sont contrôlés par un agent PAC unique, racine de la hiérarchie. Les agents médians et la racine ont pour rôle de gérer les connexions entre leurs agents fils et également de rassembler les interfaces graphiques de chacun de ces composants. Leur rôle est principalement un rôle de contrôle.

L'architecture implémentationnelle proposée appliquera donc de façon orthogonale les deux modèles d'architecture présentés : le modèle architectural proposé d'une part et PAC d'autre part.

En conclusion, cette architecture présente deux avantages. Premièrement, elle supporte directement et incite la création de composants présentant un *widget* graphique. Elle facilite donc une réflexion sur la pertinence et le choix des paramètres qui sont

modifiables à l'exécution, ainsi que le développement d'une interface permettant de modifier les paramètres retenus. Deuxièmement, les agents médians et racine peuvent réarranger les communications entre leurs agents fils. Ce choix architectural permet d'implémenter des choix de composants à l'exécution du programme bâti sur ce modèle. Par exemple les moyens de captures peuvent être choisis en cours de session, voire même combinés ou encore la stratégie d'interprétation et de traitement des caractéristiques analysées peut être changée.

## 4.2.2. Couplage avec l'Informatique Affective

### 4.2.2.1. Système eMotion

Publié dans (Clay, Couture et Nigay 2009) ; Clay, A., Couture, N. et Nigay, L. (2009), Engineering affective computing: a unifying software architecture, in 'ACII '09: Affective Computing and Intelligent Interaction', IEEE, Amsterdam Pays-Bas, pp. 1-6.

Le domaine de la reconnaissance d'émotions est un domaine très actif, marqué par un intérêt croissant depuis sa création. La première conférence internationale rassemblant les acteurs du domaine à la fois en informatique et en psychologie, ACII, s'est déroulée en 2005 et a été reconduite en 2007 et 2009. Depuis les travaux de Picard (Picard 1997) en 1997, de nombreux systèmes ont vu le jour, permettant une reconnaissance sur les divers canaux de communication émotionnelle (visage, gestuelle, voix, réaction physiologique et nerveuse), d'abord indépendamment puis simultanément. Les systèmes de reconnaissance ont donc, au fil des années, considéré les différents vecteurs de la communication émotionnelle, en commençant par le visage et la voix, pour ensuite s'intéresser à la gestuelle et enfin aux réactions physiologiques de l'émotion. La reconnaissance des émotions par ordinateur est donc un domaine en pleine maturation d'où émergent de nouveaux besoins en termes de modèles pour la conception de système de reconnaissance d'émotion.

S'intéresser au système de reconnaissance d'émotions conduit tout d'abord à définir ce qu'est une émotion. Le domaine de la psychologie (Bloch et al. 1973) nous fournit la définition suivante.

**Définition.** Une émotion est une constellation de réponses de forte intensité qui comportent des manifestations expressives, physiologiques et subjectives typiques. Elles s'accompagnent généralement de tendances d'action caractéristiques et s'inscrivent en rupture de continuité par rapport aux processus qui étaient en cours chez le sujet au moment de leur apparition.

Plus tard, (Scherer 2004) affine la définition en distinguant deux catégories d'émotions : les émotions utilitaires et les émotions esthétiques. Dans le travail présenté ici, nous considérons les émotions utilitaires définies comme ci-dessous.

**Définition.** Une émotion utilitaire est un épisode relativement bref de réponses synchronisées de tous ou de la plupart des systèmes organiques en réponse à l'évaluation d'un événement interne ou externe étant d'une importance majeure pour des besoins ou pour des buts personnels.

Il existe différents modèles de représentation de ces émotions, parmi lesquels nous avons choisi le modèle discret. Dans un modèle discret, un ensemble d'émotions est représenté par un ensemble discret où chaque type d'émotion est désigné par un label spécifique (c'est-à-dire un mot), par exemple "joie", "peur", etc. Un exemple courant de ce type de modèle est l'ensemble des émotions basiques proposées par ([Ekman 1999](#)), où chaque émotion, en tant que réponse typique de l'organisme et de notre système nerveux central, est catégorisée par le terme qui lui correspond.

Cette approche catégorielle propose un avantage certain en informatique. En effet, reconnaître une émotion d'un ensemble discret revient à choisir une catégorie (i.e. une émotion) parmi celles proposées dans l'ensemble ; et la catégorisation de signaux est un problème largement étudié en informatique, qui dispose d'outils adéquats à sa résolution (comme les réseaux de neurones). Les émotions basiques d'Ekman que nous avons retenues sont issues de la théorie évolutionniste. Pour Darwin, les émotions sont des réactions à des stimuli, préparant le corps à agir d'une certaine façon. Issues de l'évolution, elles se sont développées pour offrir une réponse extrêmement rapide et adaptée à la perception de la situation. Il est ainsi possible de voir les émotions comme des réactions préprogrammées à certains événements. Par exemple, la peur prépare le corps à la fuite alors que la colère, le prépare à l'attaque. Dans ([Ekman 1999](#)) le psychologue reprend donc la théorie évolutionniste des émotions et extrait des émotions selon une série de onze critères. Ces critères lui permettent de déterminer sept émotions dites basiques, universelles et présentes chez d'autres espèces que l'homme. Il propose donc la joie, la colère, la peur, le dégoût, la surprise, la tristesse et le mépris. Les six premières sont connues comme les "*basic six*" d'Ekman, elles servent de base à de nombreuses études en informatique affective et c'est celles que nous avons retenues pour notre étude et notre système.

Forts de ces constats et analyses, en nous appuyant sur le modèle d'architecture basé composants présenté dans le paragraphe précédent, nous avons implémenté l'application eMotion, un système de reconnaissance d'émotions par le mouvement. Dans ce cadre notre objectif était de déterminer l'émotion exprimée par la personne observée et de considérer cette émotion comme le vecteur de communication avec le système interactif. Notre but était de reconnaître l'émotion sans nous préoccuper du contexte. Nous ne nous sommes donc pas intéressés aux gestes pour une interaction actée. Ainsi, nous nous sommes concentrés sur les seules gesticulations (au sens de Kendon, vu 4.1 en page 63), qui peuvent parfois être des démonstrations affectives.

([Boone et Cunningham 1998](#)) montrent que les enfants sont capables dès quatre ans de reconnaître des émotions discrètes en observant des mouvements expressifs. Les mêmes auteurs montrent trois ans plus tard que ces enfants sont également capables d'encoder de l'émotion par la gestuelle en faisant danser un ours en peluche ([Boone et](#)

[Cunningham 2001](#)). Cette capacité à reconnaître les états affectifs par la gestuelle gagne d'ailleurs en maturité avec l'âge pour finalement décliner chez les personnes âgées, en particulier pour la reconnaissance d'émotions négatives ([Montepare et al. 1999](#)).

L'architecture logicielle présentée dans la partie précédente est donc affinée et implémentée au sein du logiciel eMotion pour, dans le contexte de l'informatique affective, s'appliquer aux systèmes interactifs de reconnaissance d'émotions par la gestuelle ([Clay, Couture et Nigay 2009](#)). Le logiciel eMotion est donc un assemblage de composants des types proposés dans le modèle architectural présenté en 4.2.1 précédent, permettant ainsi extensibilité, modifiabilité et réutilisabilité, et il se définit comme un canevas logiciel extensible pour la reconnaissance d'émotions. L'application eMotion permet en effet l'ajout de composants présentant une facette de présentation pour la paramétrisation du modèle, proposant ainsi au concepteur d'interagir avec l'application. eMotion est un assemblage de composants reliés entre eux par des flux de données et construite selon les trois niveaux de Capture, Analyse et Interprétation. Chaque composant de la branche est un agent PAC, présentant donc une facette abstraction (le corps du composant), une facette présentation (un *widget* graphique) et une facette Contrôle, permettant la communication entre les deux autres facettes et avec les autres agents PAC. Les niveaux de Capture, Analyse et Interprétation sont également implémentés sous la forme d'agent PAC. Les composants d'un niveau sont tous des agents fils de l'agent correspondant à ce niveau. Leur rôle est d'établir les connexions entre les différents composants à l'intérieur d'un niveau. Enfin, un agent PAC racine établit les connexions et échanges de données entre les trois agents PAC de Capture, Analyse et Interprétation. La version actuelle d'eMotion propose un système de reconnaissance basé sur le mouvement avec interface graphique et possibilité de choisir les composants à utiliser selon la situation, en laissant le choix du dispositif à utiliser et du mode de calcul de la composante sagittale du mouvement. Par exemple, dans le cas applicatif de la reconnaissance des émotions des danseurs (nous détaillons ce champ d'application en 4.2.2), il est possible de choisir une composante sagittale relative, et dans ce cas, le danseur avance ou recule, l'orientation de son tronc définissant l'avant, ou une composante sagittale absolue, et dans ce cas le danseur avance en se rapprochant du public et recule en s'en éloignant, quelle que soit son orientation.

La validation du canevas logiciel eMotion a été faite d'une part en modélisant des applications existantes et d'autre part en l'appliquant au développement d'un deuxième système de reconnaissance d'émotions. Une présentation détaillée a été faite dans le mémoire de ([Clay 2009](#)) et est en cours de rédaction pour publication.

#### 4.2.2.2. *Reconnaissance d'émotions : un point de vue interaction multimodale*

Publié dans ([Clay, Couture et Nigay 2010](#)) ; Clay, A., Couture, N. et Nigay, L. (2010), Reconnaissance d'émotions : un point de vue interaction multimodale, in 'Actes de IHM'10 : 22ème Conférence Francophone sur l'Interaction Homme-Machine', ACM, Luxembourg, p. to appear.

Dans ([Scherer 1984](#)), une émotion est caractérisée par une expression hautement synchronisée : le corps entier (visage, membres, réactions physiologiques) réagit à

l'unisson et l'expression émotionnelle humaine est clairement multimodale. On observe ainsi le caractère multimodal d'une expression émotionnelle. Partant de ce constat, notre modèle de conception de systèmes de reconnaissance passive des émotions a été conçu en considérant la reconnaissance d'émotions comme une forme d'interaction multimodale avec la machine. Se faisant, nous avons pu exploiter des résultats issus de l'interaction multimodale à la reconnaissance d'émotions passives.

Le paradigme de la multimodalité en Interaction Homme-Machine se caractérise par la mise à disposition de plusieurs moyens de communication entre l'utilisateur et le système, comme l'illustre l'exemple canonique du "mets ça là" combinant parole et geste de (Bolt 1980). Nous nous focalisons ici sur l'interaction multimodale en entrée, c'est-à-dire de l'utilisateur vers le système et considérons la définition d'une modalité vu page 49. Cette définition permet de caractériser une interaction en entrée en considérant deux niveaux d'abstraction, à la fois du point de vue humain et du point de vue système. Du point de vue humain, le dispositif correspond aux actions humaines à bas niveau d'abstraction : l'humain agit sur le dispositif. Le système représentationnel se situe au niveau de la cognition de l'utilisateur : quel canal de communication utiliser (e.g. la voix), comment mettre en forme l'information pour être compris de la machine (e.g. langage pseudo-naturel) ? Du point de vue système, le couple renseigne sur le dispositif mis en œuvre ainsi que sur le domaine et le format des données échangées entre l'homme et la machine. La définition étant récursive, en développant la définition, on obtient qu'une modalité est constituée d'un dispositif physique et d'une suite de systèmes représentationnels.

La modalité d'interaction définie, nous avons retenu deux modèles de conception de la multimodalité : l'espace TYCOON (Martin 1998) et les propriétés CARE (Nigay et Coutaz 1995). Ces deux espaces définissent des relations entre modalités d'interaction similaires. Nous avons privilégié les propriétés CARE<sup>32</sup>, car elles ont donné lieu à la conception d'outils basés composants ICARE (Bouchet et al. 2004) et plus récemment OpenInterface<sup>33</sup> (Lawson et al. 2009) qui supporte la conception d'applications interactives multimodales. Les propriétés CARE permettent de caractériser l'interaction multimodale selon la complémentarité, l'assignation, la redondance et l'équivalence.

Pour spécialiser la définition d'une modalité d'interaction au cas de la reconnaissance d'émotions, nous nous sommes limités dans nos travaux au cas de la reconnaissance passive des émotions, qui regroupe néanmoins la grande majorité des systèmes de reconnaissance existants (Clay 2009). En reconnaissance passive, l'utilisateur est scruté par le système. Il ne cherche pas à communiquer consciemment ses émotions à la

<sup>32</sup>CARE est l'acronyme de Complémentarité, Assignation, Redondance, et Equivalence.

La **complémentarité** entre modalités d'interaction exprime qu'il faut utiliser toutes les modalités pour obtenir une commande complète. Cela signifie qu'aucune des modalités ne suffit seule.

L'**assignation** signifie l'absence de choix : une modalité est assignée à la réalisation d'une tâche.

La **redondance** dénote l'utilisation séquentielle ou parallèle de plusieurs modalités d'interaction équivalentes : la redondance d'information en provenance de l'utilisateur implique la prise en compte d'une seule des modalités d'interaction par le système, l'autre pouvant éventuellement contribuer à fiabiliser l'expression obtenue.

Deux modalités sont **équivalentes** si elles peuvent être utilisées alternativement pour accomplir une tâche. Le choix de la modalité peut alors être effectué par l'utilisateur ou le système.

<sup>33</sup> <http://www.openinterface.org>

machine, mais se laisse observer. Or, comme nous l'avons explicité précédemment, l'émotion est un phénomène hautement synchronisé et il n'y a pas de choix du canal de communication émotionnelle et l'utilisateur ne cherche pas à mettre en forme l'information émotionnelle de son expression pour être compris par le système. En conclusion, le point de vue utilisateur pour la définition d'une modalité dans notre cadre d'étude est inutile. Nous ne considérons donc plus que l'aspect système de la modalité. Nous étendons la définition d'une modalité en assimilant chaque flux de données présent dans le système comme un système représentationnel. On réécrit alors la définition d'une modalité dans le contexte de la reconnaissance d'émotions ainsi,

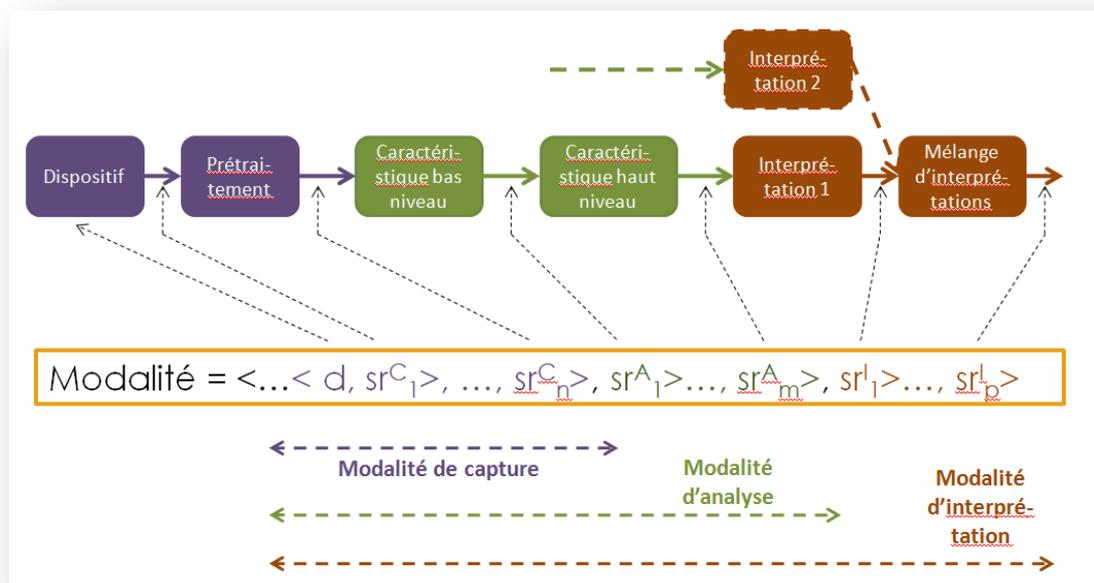
**Définition.** Soit  $m$ , une modalité dans un système de reconnaissance d'émotion,

$$m = \langle \dots \langle d, sr_1^C \rangle, sr_2^C \rangle \dots sr_n^C \rangle, \\ sr_1^A \rangle \dots \rangle, sr_m^A \rangle, \\ sr_1^I \rangle \dots sr_p^I \rangle$$

où la séquence des systèmes représentationnels explicite les transferts subis par une donnée depuis le dispositif jusqu'à son interprétation finale. On définit ainsi une **modalité de capture** comme une modalité dont le dernier système représentationnel est défini au niveau Capture,  $sr^C$ . Une **modalité d'analyse** est une modalité dont le dernier système représentationnel est défini au niveau Analyse,  $sr^A$ . Une **modalité d'interprétation** est une modalité dont le dernier système représentationnel est défini au niveau Interprétation,  $sr^I$ .

Dans notre modèle, le dispositif est assimilé à une unité de capture et chaque système représentationnel est un format de données dans une chaîne de composants comme illustré ci-dessous [Figure 34](#).

Figure 34. Traduction d'une chaîne de composants en une modalité.



Cette redéfinition de la modalité permet de réutiliser directement les propriétés CARE de la multi modalité.

En conclusion, nous avons spécialisé les définitions et les concepts de l'interaction multimodale au domaine de la reconnaissance passive des émotions et nous avons défini une modalité dans le cadre de la reconnaissance d'émotion. Cette définition permet l'application des propriétés CARE entre modalités. Le modèle conceptuel résultant a des apports à la fois en conception du système de reconnaissance d'émotions, par exemple en identifiant des combinaisons de modalités encore peu explorées (cf. section Perspectives en 4.3.1 page 77 dans la suite du mémoire), mais aussi en conception logique en définissant une décomposition fortement modulaire du code du système de reconnaissance d'émotions.

#### 4.2.3. Augmentation d'un spectacle de danse, projet ANR CARE

Publié dans (Clay, Delord, Couture et Domenger 2010) ; Clay, A., Delord, E., Couture, N. et Domenger, G. (2010), Augmenting a ballet dance show using the dancer's emotion: Conducting joint research in dance and computer science, in 'Arts and Technology', Vol. 30 of Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social Informatics and Telecommunications Engineering, Springer Berlin Heidelberg, pp. 148–156.

En nous appuyant sur les travaux précédents nous avons initié en 2006 avec Laurence Nigay, le projet ANR CARE<sup>34</sup> (*Cultural experience: Augmented Reality and Emotion*) qui combine la réalité augmentée et l'émotion pour le domaine culturel. L'objectif de CARE est de développer des éléments méthodologiques pour la conception et l'évaluation d'expériences culturelles interactives enrichies par la réalité augmentée et l'émotion. Dans ce cadre, nous avons poursuivi avec le Malandain Ballet Biarritz, une recherche conjointe en danse et en informatique, initié dans le cadre de la thèse de (Clay 2009). Nous avons dans (Clay, Delord, Couture et Domenger 2010) mis en avant les difficultés d'une telle démarche mais aussi ses apports.

Citons, en préalable, les travaux du laboratoire InfoMus<sup>35</sup> créé en 1984 qui applique l'informatique affective aux domaines culturels sous la direction scientifique d'Antonio Camurri et qui constitue, de notre point de vue, la référence sur ce domaine de recherche. Dès la fin des années 90, (Camurri et al. 1997) présentent les prémices d'une analyse basée image du mouvement pour extraire l'expressivité du mouvement qui s'appuie entre autres sur l'analyse du mouvement de Laban. Ces travaux sont poursuivis dans (Camurri et Trocca 2000), où les auteurs introduisent le calcul d'expansion et de contraction du corps, en rapport avec la kinésphère de Laban. Plus tard, (Volpe 2003) identifie des caractéristiques de mouvement relatives à la danse extraites automatiquement pour la reconnaissance d'émotions. Encore récemment, le laboratoire InfoMus a publié des travaux, que nous n'avons pas étudiés car éloignés de nos

<sup>34</sup> <http://www.careproject.fr/>, de décembre 2007 à mars 2011, projet ANR – Programme Audiovisuel et Multimédia (RIAM). Partenaires : Société Immersion (Bordeaux), Société Metapages (Toulouse), Université Joseph Fourier (laboratoires LIG et GIPSA, Grenoble), Laboratoire LIMSI (Paris), ESTIA (Bidart), Université Toulouse 3 (IRIT-IHCS, Toulouse), UTT (Troyes).

<sup>35</sup> <http://www.infomus.org/>

problématiques actuelles, concernant l'analyse du geste expressif dans des groupes d'utilisateurs.

Pour les informaticiens une telle collaboration est l'occasion d'explorer le domaine de la danse et d'étudier le langage du corps et des mouvements. Cela nous place donc dans un contexte fertile en exploration pour l'Interaction Tangible à gros grains. La capture de l'émotion exprimée par un danseur est aussi une source d'étude très riche pour la reconnaissance d'émotions par l'ordinateur. Pour les danseurs et les chorégraphes, c'est l'occasion de revenir à la source du mouvement et de re-questionner les thèmes fondamentaux de la danse que sont : le temps, l'espace et les autres, tout en leur donnant la possibilité de voir ces concepts s'animer et être représentés virtuellement dans le monde réel.

La première étape de notre collaboration a été d'établir un langage commun pour dialoguer. Pour nous scientifiques, nous avons dû comprendre certains mots propres à la danse ainsi que la signification de certains concepts comme « le temps, l'espace et les autres » cités plus haut. Pour les danseurs cela a été une ouverture sur des technologies innovantes et une meilleure compréhension de ce qu'il était possible de ramener à la danse ou pas. Puis nous avons expérimenté une recherche conjointe qui nous a apportée beaucoup d'avantages. Pour nous informaticiens, la danse et les danseurs peuvent être « utilisés » comme des études de cas et des « outils » expérimentaux. La créativité des artistes les emmène à formuler des besoins qui orientent nos propres recherches et nous font avancer. Pour les danseurs, la science elle-même est un monde à explorer à travers leur art. Les questionnements des informaticiens pour modéliser le contexte de l'interaction entraînent le danseur-chorégraphe à revisiter les fondamentaux de la danse. Finalement, développer des technologies leur offre des outils artistiques pour explorer les mondes virtuels. Ainsi, la réalité augmentée, présentée en 1.1.1 page 27, est un cadre idéal pour abriter cette recherche conjointe et trouve d'ailleurs un intérêt croissant de la part de la communauté artistique comme nous l'avons présenté par un historique et quelques travaux en introduction de ce mémoire. Nous y reviendrons dans nos perspectives en 4.3.2 au sujet du Ballet Augmenté.

Nous avons bénéficié de cette collaboration pour créer une base numérique de mouvements dansés expressifs enregistrés, qui nous a permis dans (Clay, Courgeon, Couture, Delord, Clavel et Martin 2009) de réaliser des tests perceptifs. Nous avons également participé deux fois au festival des Ethiopiennes, en 2009 et en 2010, en proposant à un public un spectacle augmenté, improvisé, combinant danse, musique, texte lu, et monde virtuel, (Domenger et al. 2009) et (Clay, Domenger, Delord, Martin, Courgeon, Decarsin, Capozzo et Corneloup 2010). Enfin, combinant intimement la communication scientifique et artistique, nous avons, à deux reprises, proposé des conférences dansées. La forme « conférence dansée » est encore rare. Citons, cependant, qu'elle a été appliquée par Pascal Picq et la compagnie Hallet Eghayan au domaine de la paléanthropologie<sup>36</sup> ainsi que par Christophe Letellier<sup>37</sup> à la théorie du chaos. Dans ces conférences dansées (Clay et al. 2008, Couture et Clay 2009), nous avons mixé un exposé

<sup>36</sup> <http://www.hominides.com/html/actualites/danse-evolution-picq.php>

<sup>37</sup> Professeur à l'Université de Rouen. La confédanse, <http://www.teatri-del-vento.org/fr/creations-danse-contemporaine/creations-archives/confedanse.html>

scientifique avec des danses improvisées appuyant notre discours, ainsi qu'une expression artistique soulignée par des commentaires techniques, ceci accompagné de musiques et de lumières appropriées. Nous avons constaté que cette forme favorise auprès de l'audience la compréhension de la problématique scientifique et du processus de recherche.

Notre expérience dans cette démarche de recherche conjointe à la fois artistique et scientifique, nous a conduits à intégrer le LABORATOIRE DE RECHERCHE CHOREGRAPHIQUE SANS FRONTIERE<sup>38</sup>. Ce laboratoire qui évolue dans un cadre européen a pour fonction d'impliquer le public qui y participe au cœur de la réflexion sur la création qui mobilise les créateurs et articule leur discours artistique. Il propose, de manière régulière, des ateliers qui s'organisent autour des quatre axes principaux du LRCSF : Pédagogie, Recherche, Création et Improvisation, dans un contexte qui insiste sur l'interdisciplinarité pour le bénéfice des danseurs, musiciens, circassiens, plasticiens, écrivains, scientifiques et enseignants qui sont intéressés pour mener une réflexion commune sur le corps par le corps. J'interviens dans le projet en tant que coordinatrice des échanges entre l'ESTIA et le LRCSF.

#### 4.2.4. Mise en action d'une modalité de sortie (*actuation*) en situation de mobilité

Publié dans (Couture et Minel 2006) ; Couture, N. et Minel, S. (2006), TactiMod dirige et oriente un piéton, in 'Proceedings of Ubimob'06 : 3ème Journées Francophones Mobilité et Ubiquité', IEEE France / ACM France, Paris France, pp. 9-16.

Nous revenons dans ce paragraphe sur la troisième boucle de rétroaction physique par actualisation décrite par Hiroshi Ishii (page 30). Cette troisième boucle a été décrite et définie dans le cadre des Interfaces Tangibles, c'est-à-dire pour l'Interaction Tangible à petits grains. Cependant, nous nous permettons une analogie avec ce concept pour notre cas d'étude qui se situe dans le cadre de l'Interaction Tangible à gros grains.

Nous avons proposé un système TactiMod, acronyme de ***Tactile Mobil device***, qui est un terminal mobile, type PDA (assistant personnel numérique) ou téléphone portable, augmenté de retours tactiles. Tactimod permet à l'ordinateur de fournir une rétroaction selon l'état de l'information numérique traitée. TactiMod est utilisé par un piéton pour aller d'un point A à un point B tout en restant concentrer sur une tout autre activité que celle de "trouver son chemin". L'intérêt de pouvoir guider un piéton pour l'aider à trouver son chemin alors qu'il consacre une attention minimale à cette tâche, donc sans utiliser de carte, a été illustré par le système *onTrack* de (Warren et al. 2005).

<sup>38</sup> LRCSF, créé en octobre 2009. Partenaires : Centre Chorégraphique National d'Aquitaine en Pyrénées Atlantiques, Teatro Victoria Eugenia de San Sébastian et ESTIA. Artistes associés : Gaël Domenger (pilote), Beñat Achiary, Michel Queuille, Julen Achiary. Scientifique associé : Alexis Clay.

**Figure 35.** Au Louvre (Paris), un parcours de visite particulier : « L'art d'être à table. Rituel et symbolique du repas. »



Nous avons montré l'utilité et l'utilisabilité de TactiMod dans le contexte d'un grand musée, où il n'est pas possible de "tout voir". Pour illustrer cette situation, pensons, par exemple, au musée du Louvre à Paris (France). L'activité principale du visiteur est de regarder les œuvres d'art tout en suivant son parcours d'intérêt indiqué en temps utile par TactiMod. Le visiteur choisit donc un parcours d'intérêt (Figure 35) (de TROY 1737) à son entrée dans le musée et il est guidé par des retours tactiles émis par le périphérique qu'il tient dans sa main ou qui est accroché à son poignet ou à sa ceinture.

L'interaction tactile est couramment utilisée en tant que flux d'entrée. En revanche, l'utilisation de retour tactile en tant que flux de sortie, ce qui est le cas de TactiMod, est encore peu développée. De même, les travaux mettant en œuvre la 3<sup>ème</sup> boucle de rétroaction sont rares, comme nous l'avons vu en 0. Citons, cependant, les travaux de (Lecolinet et Mouret 2005) qui ont inspiré le travail présenté ici, qui proposent également des retours tactiles pour "toucher du doigt les données", et ainsi augmenter la compréhension de l'utilisateur sur les informations qu'il est en train de consulter sans surcharger sa vision. Dans le même esprit, on trouve le projet MESH (*Multimodal Sensorpack for Handhelds*) de (Hughes et al. 2004). MESH est une plateforme pour des applications multimodales qui associe des capteurs inertiels à des capteurs magnétiques, du GPS et des retours vibrotactiles pour un terminal mobile type IPaq.

Nous avons conduit une expérimentation mettant TactiMod en situation pour valider l'hypothèse suivante :

**Hypothèse.** Il est possible de diriger et d'orienter une personne vers un point d'intérêt en utilisant un terminal mobile augmenté de retours tactiles.

Nous nous situons dans le paradigme initié à la fin des années 80 par Marc Weiser et son équipe de Xerox PARC : l'informatique ubiquitaire. (Weiser 1991) propose de libérer du cercle étroit de leur bureau, les personnes qui utilisent l'informatique, en leur proposant une informatique hors des murs, une informatique qui investit leur vie de tous les jours. Ainsi Weiser définit l'informatique ubiquitaire comme la possibilité d'avoir accès à la puissance de calcul n'importe où et n'importe quand ! Aujourd'hui cette notion a évolué vers l'informatique ambiante et investit notre maison (Coutaz 2008, Coutaz et al. 2010). Parallèlement, et d'une manière accélérée ces dernières années, l'informatique mobile devient notre alliée au quotidien. Les deux paradigmes, informatique ubiquitaire et informatique mobile, se rejoignent pour certaines applications ou systèmes qui tout en offrant un environnement ubiquitaire aux utilisateurs prend en compte leur mobilité. C'est le cas de TactiMod.

La localisation automatique d'un objet à l'intérieur d'un bâtiment est un problème difficile. Des solutions utilisant la technologie Bluetooth ou des technologies utilisant des répliqueurs GPS sont envisageables mais complexes à mettre en œuvre. Des solutions à base de balises RFID (système d'identification par radiofréquence) sont également potentiellement possibles. Quelque soit l'option technique choisie pour "le repérage" du terminal mobile, il faut réaliser un programme et l'installer sur le périphérique pour qu'il pilote le déclenchement des retours tactiles, c'est-à-dire l'envoi d'un signal au moteur vibreur. Compte tenu que notre objectif est de valider l'hypothèse selon laquelle il est possible de guider un piéton par une activation tactile et non concevoir un système de localisation, nous avons choisi, pour la mise en œuvre du déclenchement des vibrations, un "Magicien d'Oz". L'approche magicien d'Oz est très séduisante. Elle est utilisée depuis de nombreuses années ([Aublet-Cuvelier et al. 1996](#)) et encore aujourd'hui ([Serrano et Nigay 2010](#)) pour tester des modalités difficiles à réaliser et coûteuses en temps de développement comme ici le positionnement géographique précis du promeneur. Nous avons donc décidé d'utiliser une télécommande, plus précisément l'émetteur/récepteur d'une voiture télécommandée avec une portée d'environ 30 m. pour que l'expérimentateur/pilote puisse se tenir assez loin du sujet de l'expérimentation. Nous avons utilisé l'émetteur/récepteur de la voiture télécommandée Scarabs de Nikko, choisi pour la sobriété de la manette, de son faible coût et de la distance de commande.

Pour le système de vibration, notre choix a été dépendant des dimensions, du prix d'achat, de la tension d'alimentation, de la consommation et de la vitesse de rotation, ainsi notre choix s'est porté sur le moteur vibreur subminiature "C0315CL", voir [Figure 36](#). Ce petit moteur très léger et de faibles dimensions génère de fortes vibrations une fois alimenté. Il peut être placé indifféremment à l'horizontale ou à la verticale. La fixation et le raccordement se font par soudures.

**Figure 36. Moteur vibreur subminiature**



Il est courant de considérer la simplicité et l'aspect intuitif de l'utilisation d'un système au regard de la connaissance, de l'expérience et du niveau de concentration de l'utilisateur. Notre cas d'application concerne toutes les personnes qui viennent visiter un musée. Le niveau de connaissance de TactiMod et le niveau d'expérience de l'utilisateur par rapport à lui doivent donc être considérés comme nuls. Nous avons donc considéré comme cas général la première fois où l'utilisateur se rend dans ce musée. Le niveau de concentration quant à lui devait également être considéré proche de zéro car, et c'était l'objectif premier de TactiMod, l'utilisateur est concentré sur sa tâche principale qui est de regarder les œuvres d'art. Compte tenu de ces contraintes de conception nous n'avons pas expliqué aux sujets qui ont participé à l'expérimentation, l'utilisation du TactiMod. Ils ont dû découvrir comment l'utiliser. Ils ont dû imaginer les règles d'interprétation des retours tactiles. On remarquera cependant que dans un usage en situation réelle, on donnera à l'utilisateur les codes d'interprétation. On évitera ainsi les hésitations constatées au début de chaque passage. Il était cependant important pour nous de faire les tests dans le pire des cas. C'est-à-dire le cas où le sujet ne connaît pas les modalités d'interaction avec TactiMod : soit parce que l'on a oublié de les lui donner, soit parce qu'il ne les a pas comprises, soit parce que bien que fournies il les a

oubliées, ou encore parce qu'il n'a pas pris la peine de les écouter. Le protocole expérimental mis en place a tenu compte de la dispersion homme-femme, de la nécessité de valider l'hypothèse en utilisation à l'extérieur et à l'intérieur d'un bâtiment selon un tir aléatoire. Ainsi, nous avons testé 2 parcours différents. Le parcours intérieur est représentatif d'une visite dans un musée traditionnel. Le parcours extérieur est quant à lui une illustration d'une exposition extérieure. L'ensemble des testeurs était composé de 5 femmes et 5 hommes âgés de 21 ans à 39 ans dont 6 actifs et 4 étudiants.

### **4.3. Perspectives pour l'Interaction Tangible à gros grains**

Pour rappel, dans le CHAPITRE 1 adressant le cadre de conception des interfaces tangible, nous avons mentionné notre souhait, d'une part, d'étudier le pouvoir descriptif et génératif du modèle MCRit (conçu pour l'interaction tangible à petits grains) en l'appliquant aux interfaces tangibles à gros grains et au besoin en l'adaptant, et d'autre part de confronter le principe des 3 boucles de rétroaction de Ishii aux interfaces tangibles à gros grains. Nous n'y revenons pas ici.

#### **4.3.1. En informatique affective**

Nous avons montré ci-dessus, comment nous avons considéré la reconnaissance d'émotions comme une interaction multimodale. Ce point de vue nous permet d'explorer l'espace des possibilités en nous appuyant sur les propriétés CARE. Ainsi nous avons constaté que dans les travaux existants l'accent a principalement été mis sur la robustesse de la reconnaissance. Un recensement des systèmes existants a montré que l'équivalence, permettant un choix de modalités, est une propriété qui n'est jamais satisfaite à aucun des niveaux, que ce soit au niveau Capture (choix du dispositif), au niveau Analyse (choix des caractéristiques à extraire) ou au niveau Interprétation (choix de la méthode d'interprétation ou du modèle d'émotion à utiliser). Ce constat, outre de mettre en avant l'aspect génératif des propriétés CARE ouvre une perspective : explorer l'équivalence de modalités en reconnaissance d'émotions. Cette équivalence, qui signifie un choix entre deux modalités similaires au lieu de forcer leur utilisation en parallèle, n'existe donc pas encore dans les systèmes de reconnaissance d'émotions. Cette notion de choix de l'utilisation d'une modalité est cependant intéressante car elle permet une meilleure robustesse. Ce choix peut être effectué par l'utilisateur mais aussi par le système. Par exemple, un système reconnaissant les expressions du visage grâce à une caméra peut décider de basculer sur une reconnaissance vocale si la luminosité est trop faible. Elle permettrait aussi, autre exemple, à un système de laisser l'utilisateur préférer une reconnaissance par caméra des expressions faciales au lieu d'une reconnaissance par signaux physiologiques (plus fiables et difficiles à feindre), lui laissant plus de marge de manœuvre pour contrôler ce qu'il veut laisser transparaître ; ou au contraire de préférer une reconnaissance par signaux physiologiques si la possibilité de feindre ou cacher des émotions n'est pas souhaitée ou n'est pas permise.

En ce qui concerne la redondance, elle est fortement utilisée au niveau Capture : il n'est pas rare que plusieurs dispositifs équivalents soient mis en place pour améliorer la robustesse de la capture. La redondance au niveau Interprétation est de plus en plus utilisée car les travaux sur la reconnaissance multicanaux se basent souvent sur

plusieurs interprétations (une pour chaque canal de communication émotionnelle) basées sur les mêmes modèles d'émotions. Ces différentes interprétations fournissent donc des flux de données redondants. En revanche, au niveau Analyse, la redondance est inexistante. Notre étude de l'existant n'a pas relevé de travaux où une même caractéristique était extraite depuis des dispositifs différents. Là encore c'est une piste d'investigation.

En synthèse, la [Figure 37](#) illustre les combinaisons de modalités proposées par les propriétés CARE utilisées dans les travaux existants en reconnaissance d'émotions, en blanc, les cas non explorés que nous avons identifié et explicités précédemment.

**Figure 37. En blanc, les cas non explorés dans les systèmes existants de reconnaissance d'émotions (extrait de (Clay 2009)).**

|   |                 |         |         |                |
|---|-----------------|---------|---------|----------------|
| C | Complémentarité |         |         |                |
| A | Assignment      |         |         |                |
| R | Redondance      |         |         |                |
| E | Equivalence     |         |         |                |
|   |                 | Capture | Analyse | Interprétation |

#### 4.3.2. Ballet Augmenté et Esquisse 3D (*sketch-based modeling*)

Nous souhaitons appliquer le concept de réalité augmentée à la danse, en réalisant un « ballet augmenté ». L'objectif est de permettre à l'artiste de créer un monde virtuel sur scène dans lequel il pourra évoluer, rendant ainsi le processus de création et son résultat visibles par le public. En effet, les différents spectacles actuels se limitent à la projection de contenu virtuel sur scène, comme par exemple le système mis en place pour « *The Jew of Malta* », vu page 20, qui permet aux danseurs de manipuler les éléments virtuels comme les décors et les textures sur les habits. Aujourd'hui, il n'existe aucun système permettant au danseur de réellement créer les éléments virtuels sur scène. Sur un plan plus général, il s'agit de pouvoir générer et animer des objets 3D en utilisant la main au sein d'un vaste espace, tout en permettant à d'autres personnes, ici les spectateurs, d'assister à ces transformations. Un des verrous qui devra être levé et de permettre ceci en temps réel. Nous souhaitons offrir aux danseurs un contrôle total sur le monde virtuel en lui proposant non plus de seulement manipuler des éléments virtuels prédéfinis, mais de les créer, en faisant naître sous ses mains la matière virtuelle. Le danseur devient ainsi sculpteur, et fige dans le temps ses gestes et mouvements ; le sculpteur réalise une œuvre, mais sublime les mouvements du processus de création en une chorégraphie. Nous souhaitons que le danseur puisse éditer une forme ou une surface déjà créée ; nous souhaitons également qu'il puisse l'animer selon ses mouvements (par exemple la lancer, la faire tomber...). Le danseur doit donc pouvoir passer d'un mode « création » à un mode « interaction » lui permettant d'éditer une forme créée et de jouer avec. Dans ce cadre, il est donc nécessaire de gérer la multimodalité en proposant des techniques d'interaction dans chacun de ces modes et un moyen de passer de l'un à l'autre. Nos pistes incluent des

interactions basées sur la gestuelle (mouvements spécifiques du corps, des mains, ou des doigts) et l'utilisation d'interfaces tangibles.

Nous souhaitons donc explorer le champ de l'esquisse 3D (*sketch-based modeling*) dont l'objectif est de fournir des techniques d'interactions et des outils permettant la construction rapide et intuitive d'ébauches en trois dimensions. La réalisation d'un état de l'art nous a montré que les systèmes de sculpture 3D sont réalisés pour un environnement de type bureau et ne sont donc pas adaptés à notre cas (la scène). Parmi eux, cependant, nous retenons les travaux de ([Schkolne et al. 2001](#)) dans lesquels les artistes génèrent des surfaces en 3D directement à la main, grâce à un gant de données et un capteur pour le suivi de la main. Cette technique d'interaction génère un rendu tout à fait original qui, nous le pensons, serait adapté à notre contexte artistique. Notre première piste de recherche pour la création de matière par un danseur est donc la création de surface avec les mains dans un grand espace scénique, c'est-à-dire une scène de ballet de plusieurs dizaines de mètres carrés. Pour l'application à un grand espace, nous comptons partir des travaux de ([Keefe et Laidlaw 2005](#)) qui permettent la génération de motifs 3D dans un environnement de la taille d'une pièce et qui a vocation à être utilisé par des artistes peintres. Ces travaux ne sont pour autant pas directement exploitables car ils utilisent des interfaces tangibles de type pinceaux et pots de peinture qui ne sont pas utilisables dans notre cas. Notre première piste de recherche se base donc sur ces deux paradigmes : la peinture 3D dans un espace large, étudié par Keefe, et la génération de surfaces à la main, proposé par Schkolne. Il existe d'autres pistes, que nous comptons explorer également. Ainsi, ([Igarashi et al. 1999](#)) propose une technique dite de « blobby inflation », où l'utilisateur dessine un contour qui est transformé en un « blob » 3D, de la même façon que l'on gonfle un ballon de baudruche. Cette piste nous semble également adaptable sur scène : le danseur peut dessiner du doigt dans l'espace un contour, qui générera une forme 3D.



## Conclusion

Un certain nombre de prolongements possibles des travaux réalisés et en cours ont été présentés tout au long de ce mémoire. Après les avoir rappelés, je voudrais suggérer quelques questions qui ouvrent le champ de recherche et dessinent mon projet de recherche à moyen terme. Notons en préalable que les perspectives présentées dans ce mémoire n'ont pas pour ambition de présenter l'ensemble des perspectives possibles pour chaque thème et pour l'Interaction Tangible en général. Pour une vision prospective générale sur l'Interaction Tangible nous proposons au lecteur de se reporter aux pages 111 à 120 de la monographie récemment publiée de ([Shaer et Horneker 2010](#)). A titre de rappel, nous revenons donc sur les perspectives proposées à la fin des chapitres précédents en les citant simplement : confronter les modèles existants (MCRIT et les boucles de rétroaction) pour qu'ils englobent l'ensemble des systèmes utilisant l'Interaction Tangible qu'elle soit à petits grains ou à gros grains ; explorer le potentiel des interfaces tangible noyaux ; approfondir l'assemblage virtuel de pièces 3D par des études sur la mise en position relative et les collisions ; faire avancer l'intégration des interactions tangible et tactile et l'appliquer au champ des géosciences ; explorer les conséquences de l'introduction de l'équivalence et de la redondance au niveau analyse dans les systèmes existants de reconnaissance d'émotions ; contribuer à la mise en œuvre d'un Ballet Augmenté autorisant le danseur à créer des sculptures numériques 3D. Je souhaiterais également aborder 3 nouvelles questions qui s'échappent du strict périmètre des thèmes présentés dans ce mémoire mais qui ouvrent, de notre point de vue, d'intéressantes perspectives tout en prolongeant le travail déjà entrepris.

### Comment gérer le point de vue en Réalité Augmentée ?

Depuis 2006, nous poursuivons un objectif global : favoriser l'utilisation de la réalité augmentée dans les arts scéniques en proposant de nouveaux paradigmes d'interaction. Le premier paradigme que nous avons exploré est celui de la reconnaissance d'émotions. Dans ce cadre nous avons conçu un modèle d'architecture pour les systèmes de reconnaissance d'émotions que nous avons instancié pour créer un système de reconnaissance d'émotions par le mouvement. Ainsi, nous reconnaissons les émotions exprimées par un danseur, et les utilisons déjà comme paramètres pour l'animation d'une forme 3D (changements de taille, de couleur...) affichée sur scène. Poursuivant notre objectif, nous démarrons un travail sur la sculpture numérique 3D. Il reste, cependant, encore à prendre en compte la question du point de vue des spectateurs. Ce qui nous intéresserait précisément ici, c'est de savoir comment construire une image virtuelle qui soit pertinente à partir de différents points de vue ? Cela n'inclut-il pas que nous devrions construire des images différentes selon ces mêmes points de vue ? Nous pourrions travailler sur les différences de perception et en faire un point clé de notre démarche en combinant art et science pour répondre à cette problématique du point de vue.

### Comment piloter de manière tangible des simulations de déformations ?

Dans le cadre de SeARCH, outre les travaux sur l'assemblage 3D déjà présentés, nous souhaitons élaborer une interface tangible permettant de retrouver la forme d'origine d'une pièce archéologique métallique déformée. L'idée est de partir d'une forme initiale supposée, de lui appliquer un ensemble de forces et de simuler les applications de ces

forces au cours du temps. Ainsi, la pièce métallique déformée par simulation pourra être comparée à la pièce issue des fouilles. Par itérations successives, la forme initiale de la pièce archéologique pourra être ainsi découverte par les archéologues. L'interface tangible devra offrir une interaction bimanuelle et masquer toutes les difficultés inhérentes au type de méthodes utilisées telles qu'application des conditions aux limites, préparation du maillage, etc. Nous proposons de nous appuyer sur les travaux menés ces dernières années à partir du ShapeTape de chez Measurand issu des travaux de ([Balakrishnan et al. 1999](#)). Le ShapeTape est un ruban numérique comportant 11 points de mesure munis de 3 capteurs par point. Ces dernières années, le ShapeTape a été exploré pour le dessin et nous souhaitons étudier son potentiel pour le pilotage d'une simulation de déformation.

### Quelles évaluations et quels tests d'usages pour l'Interaction Tangible ?

Comme nous l'avons vu dans la partie 1.2.3 l'évaluation et les tests d'usages de systèmes basés sur une Interaction Tangible sont encore très peu formalisés. Nous comptons explorer cette dimension usage de l'Interaction Tangible, petits grains et gros grains, en nous appuyant sur la Plateforme d'Evaluation de Prototypage et de TeSts d'UsageS (PEPSS) mise en place à l'ESTIA grâce à une mutualisation des savoir-faire D'ESTIA-RECHERCHE et de PARIS DESCARTES/LATI/ERGO. La PEPSS a été créée pour le développement et l'optimisation de méthodes d'évaluation des comportements humains, individuels et collectifs tout en offrant la possibilité de prototyper des systèmes innovants. Les interfaces tangibles et les systèmes de captures de mouvements sont donc dans le champ d'investigation de cette plateforme. Elle nous permettra de mettre en place des bancs d'expérimentations pour des tests d'usage et des évaluations de nos systèmes centrés sur l'Interaction Tangible. L'étape d'après serait de tester le bon fonctionnement d'une interface tangible. Pour cela, les travaux que nous menons actuellement ([Ridene et al. 2010](#)) pour la définition d'un langage de modélisation spécifique au domaine du test d'applications pour téléphones mobile (*DSML*) pourrait nous aider. En effet, nous voyons des analogies entre ces deux objectifs, en apparence éloignés. Pour tester une interface tangibles on a des contraintes de tests similaires à celles que l'on rencontre pour le test sur mobiles (c'est-à-dire appuyer, bouger, glisser, tourner...). L'idée de faire un DSL pour tester comment réagit une interface tangible pourrait donc faire l'objet d'un sujet de recherche.

En conclusion, la souris et le clavier dominant notre façon d'interagir avec l'ordinateur depuis maintenant plus de vingt ans et il reste énormément de travail à faire pour développer l'Interaction Tangible. Nous souhaitons, par nos travaux, contribuer au développement de l'informatique ubiquitaire et à la diffusion de systèmes qui proposent une interaction directe et transparente<sup>39</sup>. Des systèmes qui permettent d'agir dans l'espace qui convient pour réaliser la tâche et non pas forcément devant un écran. Des systèmes qui n'engendrent pas de stress, ce qui n'est pas toujours le cas lors de l'utilisation des ordinateurs, et qui n'éloignent pas l'utilisateur de la tâche qu'il a à accomplir. La recherche que nous menons sur l'Interaction Tangible contribuera, nous l'espérons, à ce changement d'ère qui nous fera basculer, selon ([Weiser 1991](#)), dans l'ère de la technologie calme.

---

<sup>39</sup> Souvent qualifiée *seamless interaction*.

## Bibliographie

---

- Aish, R. (1979), '3D input for CAAD systems', *Computer-Aided Design* **11**(2), 66–70.
- ARToolKit (2.72), '<http://www.hitl.washington.edu/artoolkit/>'.
- Astrahan, M., Housman, B., Jacobs, J., Mayer, R. et Thomas, W. (1957), 'Logical design of the digital computer for the sage system', *IBM J. Res. Dev.* **1**(1), 76–83.
- Aublet-Cuvelier, L., Carraux, E., Coutaz, J., Nigay, L., Portolan, N., Salber, D. et Zanello, M.-L. (1996), Neimo, un laboratoire d'utilisabilité numérique : Leçons de l'expérience, in 'ERGO-IA'96', AFCET SELF IDLS, pp. 149–160.
- Balakrishnan, B. et Hinckley, K. (1999), The role of kinesthetic reference frames in two-handed input performance, in 'UIST '99: Proceedings of the 12th annual ACM symposium on User interface software and technology', ACM, New York, NY, USA, pp. 171–178.
- Balakrishnan, R., Fitzmaurice, G., Kurtenbach, G. et Buxton, W. (1999), Digital tape drawing, in 'In ACM Symposium on User Interface Software and Technology', pp. 161–169.
- Baskinger, M. et Gross, M. (2010), 'Cover story: Tangible interaction = form + computing', *interactions* **17**, 6–11.
- Beaudouin-Lafon, M. (1997), Interaction instrumentale : de la manipulation directe à la réalité augmentée, in 'IHM'97 : Actes des Neuvièmes Journées sur l'Ingénierie des Interfaces Homme-Machine', Cépaduès-Éditions, pp. 97–104.
- Beaudouin-Lafon, M. (2000), Instrumental interaction: an interaction model for designing post-WIMP user interfaces, in 'CHI '00: Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems', ACM, New York, NY, USA, pp. 446–453.
- Benoit, A., Caplier, A., Durette, B. et Hérault, J. (2007), From bio-inspired vision toolbox to real-time computer vision algorithms, in 'European Retina Meeting', Frankfurt Germany. Département Images et Signal.
- Bérard, F. (2003), The Magic Table: Computer-Vision Based Augmentation of a Whiteboard for Creative Meetings, in 'ICCV '03: CD-ROM proceedings of the Ninth IEEE International Conference in Computer Vision, First IEEE International Workshop on Projector-Camera Systems (PROCAMS'03)', IEEE Computer Society Press.
- Blackwell, A. et Edge, D. (2009), Articulating tangible interfaces, in ACM, ed., 'Proceedings of the International Conference on Tangible and Embedded Interaction TEI'09', ACM, Cambridge, pp. 113–118.
- Bloch, H., Chemama, R., Gallo, A., Leconte, P., Le Ny, J., Postel, J., Moscovici, S., Reuchlin, M. et Vurpillot, E. (1973), *Grand dictionnaire de la psychologie*, Larousse.
- Bolt, R. (1980), "Put-that-there": Voice and gesture at the graphics interface, in 'SIGGRAPH '80: Proceedings of the 7th annual conference on Computer graphics and interactive techniques', ACM, New York, NY, USA, pp. 262–270.
- Boone, R. et Cunningham, J. (1998), 'Children's decoding of emotion in expressive body movement: The development of cue attunement', *Developmental Psychology* **34**, 1007–1016.
- Boone, R. et Cunningham, J. (2001), 'Children's expression of emotional meaning in music through expressive body movement', *Journal of Nonverbal Behavior* **25**(1), 21–41.
- Boothroyd, G. et Dewhurst, P. (1993), *Product Design for Assembly, A Designer's Handbook*, Département of Mechanical Engineering.

- Bouchet, J., Nigay, L. et Balzagette, D. (2004), 'ICARE: Approche à composants pour l'interaction multimodale', *Actes des Premières Journées Francophones: Mobilité et Ubiquité 2004* pp. 36–43.
- Bowman, D. A., Kruijff, E., LaViola, J. J. et Poupyrev, I. (2004), *3D User Interfaces: Theory and Practice*, Addison Wesley Longman Publishing Co., Inc., Redwood City, CA, USA.
- Butz, A., Groß, M. et Krüger, A. (2004), TUISTER: a tangible UI for hierarchical structures, in 'IUI '04: Proceedings of the 9th international conference on Intelligent user interfaces', ACM, New York, NY, USA, pp. 223–225.
- Buxton, W. et Myers, B. (n.d.), 'A study in two-handed input', *SIGCHI Bull.* (4), 321–326.
- Calvillo-Gamez, E. H., Leland, N., Shaer, O. et Jacob, R. J. K. (2003), The tac paradigm: Unified conceptual framework to represent tangible user, in 'In Proceedings of LAHCI', ACM Press, pp. 9–15.
- Camurri, A., Chiarvetto, R., Coglio, A., Di Stefano, M., Liconte, C., Massari, A., Massucco, C., Murta, D., Nervi, S., Palmieri, G. et al. (1997), Toward Kansei Information Processing in music/dance interactive multimodal environments, in 'Proceedings of the Italian Association for Musical Informatics (AIMI) International Workshop - Kansei: The Technology of Emotion', pp. 74–78.
- Camurri, A. et Trocca, R. (2000), 'Analysis of expressivity in movement and dance', *Proceedings of CIM-2000, L'Aquila, AIMI*.
- Clay, A. (2009), La branche émotion, un modèle conceptuel pour l'intégration de la reconnaissance multimodale d'émotions dans des applications interactives : application au mouvement et à la danse augmentée, PhD thesis, Université de Bordeaux. co-direction à 60%.
- Clay, A., Courgeon, M., **Couture**, N., Delord, E., Clavel, C. et Martin, J. (2009), Expressive virtual modalities for augmenting the perception of affective movements, in 'AFFINE '09: Proceedings of the International Workshop on Affective-Aware Virtual Agents and Social Robots', ACM, New York, USA, pp. 1–7.
- Clay, A., **Couture**, N. et Nigay, L. (2009), Engineering affective computing: a unifying software architecture, in 'ACII '09: Affective Computing and Intelligent Interaction', IEEE, Amsterdam Pays-Bas, pp. 1–6.
- Clay, A., **Couture**, N. et Nigay, L. (2010), Reconnaissance d'émotions : un point de vue interaction multimodale, in 'Actes de IHM'10 : 22ème Conférence Francophone sur l'Interaction Homme-Machine', ACM, Luxembourg, pp. 157–160.
- Clay, A., Delord, E., **Couture**, N. et Domenger, G. (2010), Augmenting a ballet dance show using the dancer's emotion: Conducting joint research in dance and computer science, in 'Arts and Technology', Vol. 30 of *Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social Informatics and Telecommunications Engineering*, Springer Berlin Heidelberg, pp. 148–156.
- Clay, A., Domenger, G. et **Couture**, N. (2008), Reconnaissance d'émotions : Application à la danse. Festival de Montauray, Anglet.
- Clay, A., Domenger, G., Delord, E., Martin, J., Courgeon, M., Decarsin, E., Capozzo, J. et Corneloup, F. (2010), Improvisation dansé augmentée : capture d'émotions. Les Ehiopiques'10, Bayonne, France.
- Coutaz, J. (1987), PAC, an object oriented model for dialog design, in H. Bullinger et B. e. Shackel, eds, 'Proceedings of the 2nd IFIP International Conference on Human-Computer Interaction (INTERACT 87)', Vol. 87, pp. 431–436.
- Coutaz, J. (2008), End-user programming for the home: a challenge, in 'Proc. @home workshop in conjunction with Pervasive 2008'.

- Coutaz, J., Fontaine, E., Mandran, N. et Demeure, A. (2010), About composing our own smart home. EUD4Services (End-User Development for Services) workshop, in Conjunction with AVI 2010, Rome, May 2010.
- Coutaz, J., Lachenal, C. et Dupuy-Chessa, S. (2003), Ontology for multi-surface interaction, in 'Proceedings of Interact 2003'.
- Couture**, N. (2002), 'SIMAPI, simulation de procédés et 3D', SIMO. Toulouse, France.
- Couture**, N. et Clay, A. (2009), Capture d'émotions et reconnaissance par la gestuelle : conférence-démonstration dansée, in 'Workshop Emotion - Innovation - Technologie (ERGOIA'09)', Paris France.
- Couture**, N., Depaulis, F., Garreau, L. et Legardeur, J. (2005), SKUA: a platform based on Tangible User Interface dedicated to mechanical CAD parts assembly, in 'VC'05: Proceedings of Virtual Concept', Biarritz France, pp. 99–100.
- Couture**, N. et Minel, S. (2006), TactiMod dirige et oriente un piéton, in 'Proceedings of Ubimob'06 : 3ème Journées Francophones Mobilité et Ubiquité', IEEE France / ACM France, Paris France, pp. 9–16.
- Couture**, N. et Riviere, G. (2006), Faisabilité d'une Interface Tangible pour la Validation d'Hypothèses en Géosciences, in 'Proceedings of Ubimob'06 : 3ème Journées Francophones Mobilité et Ubiquité', IEEE France / ACM France, Paris France, pp. 163–164.
- Couture**, N., Riviere, G. et Legardeur, J. (2008), 'Tangible user interface integration in engineering', *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)* 2(3), 175–182.
- Couture**, N., Riviere, G. et Reuter, P. (2008), GeoTUI: A Tangible User Interface for Geoscience, in 'TEI'08: Proceedings of the 2d International Conference on Tangible and Embedded Interaction', ACM, Bonn Allemagne, pp. 89–96.
- Couture**, N., Riviere, G. et Reuter, P. (2009), Tangible Interaction in Mixed Reality Systems, in G. P. Dubois E. et Nigay L., eds, 'MIXER - The Engineering of Mixed Reality Systems', Human-Computer Interaction Series, Springer-Verlag, chapter 6, pp. 101–120.
- de TROY, J.-F. (1737), 'Un déjeuner de chasse, (détail)'. (Paris, 1679 - Rome, 1752).
- Depaulis, F., **Couture**, N., Legardeur, J. et Garreau, L. (2005), A reusable methodology based on filters in order to define relevant tangible parts for a TUI, in SPIA, ed., 'SPIE'05: Proceedings of Electronic Imaging Science and Technology, Stereoscopic Displays and Virtual Reality Systems XII', Vol. 5664, San Jose, USA, pp. 530–539.
- Domenger, G., Reumaux, A., Clay, A., Delord, E. et **Couture**, N. (2009), Un compte numérique. Les Ethiopiennes'09, Bayonne.
- Dourish, P. (2001), *Where the Action Is: The Foundations of Embodied Interaction*, MIT Press.
- Ekman, P. (1999), 'Basic emotions', *Handbook of cognition and emotion* pp. 45–60.
- Ekman, P. et Friesen, W. (1969), *The repertoire of nonverbal behavior*, Mouton de Gruyter.
- Fishkin, K. (2004), 'A taxonomy for and analysis of tangible interfaces', *Personal and Ubiquitous Computing* 8(5), 347–358.
- Fitzmaurice, G. (1996), Graspable User Interfaces, PhD Thesis, PhD thesis, University of Toronto.
- Fitzmaurice, G. W., Ishii, H. et Buxton, W. (1995), Bricks: Laying the foundations for graspable user interfaces, in I. R. Katz, R. L. Mack, L. Marks, M. B. Rosson et J. Nielsen, eds, 'Proceedings of the ACM CHI 95 Human Factors in Computing Systems Conference', ACM Press.

- Frazer, J. (1980), Intelligent physical three-dimensional modelling system, *in* 'Proceedings of Computer Graphics'80', Blenheim Online Publications, London, UK, pp. 359–370.
- Frei, P., Su, V., Mikhak, B. et Ishii, H. (2000), Curlybot: designing a new class of computational toys, *in* 'CHI '00: Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems', ACM, New York, NY, USA, pp. 129–136.
- Garreau, L. (2005), Une interface utilisateur tangible pour l'assemblage en CAO, PhD thesis, Université de Bordeaux. co-direction à 90%.
- Garreau, L., Legardeur, J. et **Couture**, N. (2003), Tangible Interface for mechanical CAD parts assembly, *in* 'Proceedings of the International Conference Virtual Concept 2003 Virtual Concept', Biarritz France, pp. 222–227.
- Garreau, L., Legardeur, J. et **Rouillon Couture**, N. (2005), 'Une plateforme basée sur les interfaces tangibles pour l'assemblage en CFAO', *Interaction homme-machine et CAO (Revue internationale d'ingénierie numérique (RIIN))* 1(2), 133–148.
- González-Calleros, J. M., Vanderdonckt, J. et Arteaga, J. M. (2009), A structured approach to support 3d user interface development, *in* 'ACHI', pp. 75–81.
- Goursat, M., Gomez, C. et **Rouillon**, N. (1994), 'GeCI + SCILab + CalICo + Metanet + ... ou comment faire communiquer des outils existants', Journées du GDR Programmation, Lille.
- Guiard, Y. (1987), 'Asymmetric division of labor in human skilled bimanual action: The kinematic chain as a model', *Journal of Motor Behavior* 19(4), 486–517.
- Han, J. (2005), Low-cost multi-touch sensing through frustrated total internal reflection, *in* 'UIST '05: Proceedings of the 18th annual ACM symposium on User interface software and technology', ACM, New York, NY, USA, pp. 115–118.
- Hinckley, K., Pausch, R., Goble, J. et Kassell, N. (1994), Passive Real-World Interface Props for Neurosurgical Visualization, *in* 'CHI '94: Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems', ACM, New York, NY, USA, pp. 452–458.
- Hornecker, E. (2009), 'Encyclopedia entry on tangible interaction'. This is an electronic document. Date of publication: May 8, 2009. Date retrieved: July 30, 2010. Date last modified: November 11, 2009.
- Hornecker, E. et Buur, J. (2006), Getting a grip on tangible interaction: a framework on physical space and social interaction, *in* 'Proceedings of ACM CHI 2006 Conference on Human Factors in Computing Systems', ACM Press.
- Hornecker, E., Jacob, R. J. K., Hummels, C., Ullmer, B., Schmidt, A., van den Hoven, E. et Mazalek, A. (2008), 'Tei goes on: Tangible and embedded interaction', *IEEE Pervasive Computing* 7, 91–96.
- Huang, Q.-X., Flöry, S., Gelfand, N., Hofer, M. et Pottmann, H. (2006), 'Reassembling fractured objects by geometric matching', *ACM Trans. Graph.* 25(3), 569–578.
- Hughes, S., Oakley, I. et O'Modhrain, S. (2004), Mesh: Supporting mobile multimodal interfaces, *in* 'ACM User Interface Software and Technology (UIST'04)', ACM Press, Santa-Fe, NM.
- Igarashi, T., Matsuoka, S. et Tanaka, H. (1999), Teddy: a sketching interface for 3d freeform design, *in* 'SIGGRAPH '99: Proceedings of the 26th annual conference on Computer graphics and interactive techniques', ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., New York, NY, USA, pp. 409–416.
- Ishii, H. (2008), Tangible Bits: Beyond Pixels, *in* 'TEI '08: Proceedings of the Second International Conference on Tangible and Embedded Interaction', ACM Press, New York, NY, USA, pp. XV–XXV.

- Ishii, H., Ratti, C., Piper, B., Wang, Y., Biderman, A. et Ben-Joseph, E. (2004), 'Bringing clay and sand into digital design - continuous tangible user interfaces', *BT Technology Journal* **22**, 287–299.
- Ishii, H., Ren, S. et Frei, P. (2001), Pinwheels: visualizing information flow in an architectural space, in 'CHI '01: Extended abstracts on Human factors in computing systems', ACM, New York, NY, USA, pp. 111–112.
- Ishii, H. et Ullmer, B. (1997), Tangible bits: Towards seamless interfaces between people, bits and atoms, in S. Pemberton, ed., 'Proceedings of the ACM CHI 97 Human Factors in Computing Systems Conference', ACM Press.
- Johnson, J., Roberts, T. L., West, U., Technologies, A., Idtwo, W. V., Smith, D. C., Irby, C. H., Beard, M., Systems, M. C. et Xerox, K. M. (1989), 'The xerox star: A retrospective', *IEEE Computer* **22**, 11–29.
- Jurado, F., Sinoquet, D. et Lailly, P. (1996), Jerry: a 3D reflection tomography designed for complex structures, in 'KIM 1996 Annual Report', Institut Français du Pétrole, Pau, France.
- Kaiser, P. (1998), Hand-Drawn Spaces, in 'SIGGRAPH'98', ACM, p. 134.
- Keefe, D. F. et Laidlaw, D. H. (2005), A haptic interface for creating smooth 3d curves with varying line weight, in 'SIGGRAPH '05: ACM SIGGRAPH 2005 Posters', ACM, New York, NY, USA, p. 99.
- Kendon, A. (2004), *Gesture: Visible action as utterance*, Cambridge Univ Pr.
- Kendon, A. et Language, W. (1988), 'How gestures can become like words', *Crosscultural perspectives in nonverbal communication* pp. 131–141.
- Kitamura, Y., Itoh, Y. et Kishino, F. (2001), Real-time 3d interaction with activecube, in 'CHI '01 extended abstracts on Human factors in computing systems', CHI '01, pp. 355–356.
- Kuefner, J. (2010), Paperbox 3D - A Novel Approach for the Development of Tangible User Interfaces (TUI), Master's thesis, University of Munich (LMU), LFE Mediainformatics.
- Lawson, J.-Y. L., Al-Akkad, A.-A., Vanderdonckt, J. et Macq, B. (2009), An open source workbench for prototyping multimodal interactions based on off-the-shelf heterogeneous components, in 'EICS '09: Proceedings of the 1st ACM SIGCHI symposium on Engineering interactive computing systems', ACM, New York, NY, USA, pp. 245–254.
- Lecolinet, E. et Mouret, G. (2005), Tactiball, tactipen, tactitab, ou comment "toucher du doigt" les données de son ordinateur, in '12<sup>e</sup>me conférence Francophone sur l'Interaction Homme-Machine (IHM'05)', ACM Press, Toulouse, France, pp. 227–230.
- Leganchuk, A., Zhai, S. et Buxton, W. (1998), 'Manual and cognitive benefits of two-handed input: an experimental study', **5**(4), 326–359.
- Legardeur, J., Garreau, L. et Couture, N. (2004), Experiments to evolve toward a tangible user interface for CAD parts assembly, in SPIE, ed., 'SPIE'04: Proceedings of Electronic Imaging Science and Technology, Stereoscopic Displays and Virtual Reality Systems XI', Vol. 5291, San Jose, USA, pp. 438–445.
- Legardeur, J., Garreau, L. et Couture, N. (2005), SKUA : une plateforme basée sur des interacteurs pour l'assemblage mécanique en CAO, in 'Electronic Proceedings of CPI 2005: the 4th International Conference: Integrated Design and Production', Casablanca Maroc. 11 pages.
- Martin, J. (1998), 'TYCOON: Theoretical framework and software tools for multimodal interfaces', *Intelligence and Multimodality in Multimedia interfaces* .

- Meador, W. S., Rogers, T. J., O'Neal, K., Kurt, E. et Cunningham, C. (2004), 'Mixing dance realities: collaborative development of live-motion capture in a performing arts environment', *Comput. Entertain.* **2**(2), 12–12.
- Merlo, C. et **Couture**, N. (2010), A tabletop-based collaborative environment to enhance direct interactions between designers, in I. Horváth, F. Mandorli et Z. Rusák, eds, 'Proceedings of TMCE 2010 Symposium', pp. 447–460.
- Milgram, P. et Kishino, F. (1994), 'A Taxonomy of Mixed Reality Visual Displays', *IEICE Transactions on Information Systems* **E77-D**(12), 1321–1329.
- Moggridge, B. (n.d.), *Designing Interactions*, 1 edn, The MIT Press, chapter 8, Durrel, Bishop, p. 545.
- Moncrief, W. et Marshall, G. (2004), 'The evolution of the seven steps of selling', *Industrial Marketing Management* **34**(1), 13–22.
- Montepare, J., Koff, E., Zaitchik, D. et Albert, M. (1999), 'The use of body movements and gestures as cues to emotions in younger and older adults', *Journal of Nonverbal Behavior* **23**(2), 133–152.
- Nigay, L. et Coutaz, J. (1995), A generic platform for addressing the multimodal challenge, in 'CHI '95: Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems', ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., New York, NY, USA, pp. 98–105.
- Nigay, L. et Coutaz, J. (1997), Multifeature systems: The care properties and their impact on software design, in 'Multimedia Interfaces: Research and Applications, chapter 9', AAAI Press.
- Norman, D. (1988), *The Psychology of Everyday Things*, Basic Books, New York, NY, USA.
- Norman, D. (1999), 'Affordance, conventions, and design', *Interactions* **6**(3), 38–43.
- Patten, J. et Ishii, H. (2007), Mechanical constraints as computational constraints in tabletop tangible interfaces, in 'CHI '07: Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems', ACM, New York, NY, USA, pp. 809–818.
- Phidgets (n.d.), '<http://www.phidgets.com/>'.
- Picard, R. (1997), *Affective computing*, MIT press.
- Pierce, J. S., Stearns, B. C. et Pausch, R. (n.d.), Voodoo dolls: seamless interaction at multiple scales in virtual environments, in 'I3D '99: Proceedings of the 1999 symposium on Interactive 3D graphics', ACM, New York, NY, USA, pp. 141–145.
- Raffle, H., Parkes, A. et Ishii, H. (2004), Topobo: a constructive assembly system with kinetic memory, in 'CHI '04: Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems', ACM, New York, NY, USA, pp. 647–654.
- reactIVision (1.4), '<http://reactivision.sourceforge.net/>'.
- Rejneri, N. (2000), Détermination et simulation des opérations d'assemblage lors de la conception de systèmes mécaniques, PhD thesis, Institut National Polytechnique de Grenoble.
- Reuter, P., Riviere, G., **Couture**, N., Mahut, S. et Espinasse, L. (2010), 'ArcheoTUI - Driving virtual reassemblies with tangible 3D interaction', *Journal on Computing and Cultural Heritage (JOCCH 2010)* **3**(2), 1–13.
- Reuter, P., Rivière, G., **Couture**, N., Mahut, S., Sorraing, N. et Espinasse, L. (2008), ArcheoTUI - tangible interaction with foot pedal declutching for the virtual reassembly of fractured archeological objects, in 'VRST '08: Proceedings of the symposium on Virtual reality software and technology', ACM, New York, NY, USA, pp. 307–308.

- Reuter, P., Rivière, G., **Couture**, N., Sorraing, N., Espinasse, L. et Vergnieux, R. (2007), ArcheoTUI - a tangible user interface for the virtual reassembly of fractured archeological objects, in 'VAST2007: Proceedings of the 8th EuroGraphics International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage', EuroGraphics Association, Aire-la-Ville, Switzerland, pp. 15–22.
- Ridene, Y., Belloir, N., Barbier, F. et **Couture**, N. (2010), A DSML for mobile phone application testing, in 'Proceedings of DSM2010, 10th Workshop on Domain-Specific Modeling', p. to appear.
- Riviere, G. (2009), Interaction Tangible sur Table Interactive : application aux géosciences, PhD thesis, Université de Bordeaux. co-direction à 90%.
- Riviere, G. et **Couture**, N. (2008), The Design of a Tribal Tabletop, in 'Tabletop '08: Proceedings of the Third IEEE International Workshop on Horizontal Interactive Human-Computer Systems', IEEE Computer Society, Amsterdam Pays-Bas, pp. 29–30. extended abstract and poster.
- Riviere, G., **Couture**, N. et Jurado, F. (2009), 'Tangible User Interfaces for geosciences', *SEG Technical Program Expanded Abstracts* **28**(1), 1137–1141. SEG.
- Riviere, G., **Couture**, N. et Reuter, P. (2010), 'The activation of modality in virtual objects assembly', *Journal on Multimodal User Interfaces (JMUI 2010)* **3**(3), 189–196.
- Rouillon**, N. (1994a), 'CallCo, Computation and Image in Combinatorics', Computer Science Dept., Bond University, Gold Coast, Australia.
- Rouillon**, N. (1994b), 'CallCo, Computation and Image in Combinatorics', Computer Science Dept., University of Queensland, Brisbane, Australia.
- Rouillon**, N. (1994c), Calcul et Image en Combinatoire, PhD thesis, Université Bordeaux 1.
- Rouillon**, N. (1994d), 'Polyominoes and q-analogues of Bessel functions, a combinatorial proof', Mathematical Dept., University of Queensland, Brisbane, Australia.
- Schepacz, C. (1991), 'Des méthodes pour un assemblage-montage rationnel', *CETIM informations* (123), 29–35.
- Scherer, K. (1984), *On the nature and function of emotion: a component process approach*, Approaches to emotion, k.r. scherer and p. ekman (eds.) edn, NJ: Erlbaum, Hillsdale.
- Scherer, K. (2004), 'Which emotions can be induced by music? what are the underlying mechanisms? and how can we measure them?', *Journal of New Music Research* **33**(3), 239–251.
- Scherer, K. et Wallbott, H. (1985), 'Analysis of nonverbal behavior', *Handbook of discourse analysis* **2**, 199–230.
- Schkolne, S., Pruett, M. et Schröder, P. (2001), Surface drawing: creating organic 3d shapes with the hand and tangible tools, in 'Proceedings of the 2001 SIGCHI conference on Human factors in computing systems (CHI'01)', ACM, New York, NY, USA, pp. 261–268.
- Serrano, M. et Nigay, L. (2010), 'A wizard of oz component-based approach for rapidly prototyping and testing input multimodal interfaces', *Journal on Multimodal User Interfaces, Springer Publ.* **3**(3), 215–225.
- Shaer, O. et Horneker, E. (2010), 'Tangible user interfaces: Past, present and future directions', *Foundations and Trends in Human-Computer Interaction* **3**, 1–137.
- Sutherland, I. E. (1968), A head-mounted three dimensional display, in 'AFIPS '68 (Fall, part I): Proceedings of the December 9-11, 1968, fall joint computer conference, part I', ACM, New York, NY, USA, pp. 757–764.

- TUIO Protocol (2.0), '<http://www.tuio.org/>'.
- Ullmer, B. (2002), *Tangible Interfaces for Manipulating Aggregates of Digital Information*, PhD thesis, Massachusetts Institute of Technology.
- Ullmer, B. et Ishii, H. (2000), 'Emerging frameworks for tangible user interfaces', *IBM System Journal* **39**(3/4), 915–931.
- Ullmer, B., Ishii, H. et Jacob, R. J. K. (2005), 'Token+constraint systems for tangible interaction with digital information', *ACM Trans. Comput.-Hum. Interact.* **12**(1), 81–118.
- Ullmer, B., Sankaran, R., Jandhyala, S., Tregre, B., Toole, C., Kallakuri, K., Laan, C., Hess, M., Harhad, F., Wiggins, U. et Sun, S. (2008), Tangible menus and interaction trays: core tangibles for common physical/digital activities, in 'TEI '08: Proceedings of the 2nd international conference on Tangible and embedded interaction', ACM, New York, NY, USA, pp. 209–212.
- Vatavu, R., Grisoni, L. et Pentiu, S.-G. (2009), 'Multiscale detection of gesture patterns in continuous motion trajectories'.
- Volpe, G. (2003), *Computational models of expressive gesture in multimedia systems*, PhD thesis, University of Genova.
- Wallace, J. et Scott, S. (2008), Contextual Design Considerations for Co-located, Collaborative Tables, in 'Tabletop 2008: Proceedings of the Third IEEE International Workshop on Horizontal Interactive Human-Computer Systems', IEEE Computer Society Press, Los Alamitos, CA, USA, pp. 61–68.
- Warren, N., Jones, M., Jones, S. et Bainbridge, D. (2005), Navigation via continuously adapted music, in 'SIGCHI conference on Human factors in computing systems (CHI 2005)', ACM Press, New York, Portland, Oregon, USA, pp. 1849–1852.
- Weiser, M. (1991), 'The computer for the 21st century', *Scientific American* **265**(3), 66–75.
- Wellner, P. (1993), 'Interacting with paper on the digitaldesk', *Commun. ACM* **36**(7), 87–96.
- Wiethoff, A., Conradi, B. et Butz, A. (2010), 'Artifacts in the design process of pervasive computing'.