

Quand les surfaces deviennent interactives ...

J. Coutaz, C. Lachenal,
F. Bérard, N. Barralon

Résumé

Les avancées technologiques appellent de nouvelles formes d'interaction où s'estompent progressivement les frontières entre les mondes physiques et numériques. Dans le monde physique, les surfaces jouent un rôle prédominant. Le calcul numérique, quant à lui, offre une puissance fonctionnelle illimitée. Dans cet article, nous nous intéressons à l'alliance des deux avec la notion de surface interactive. Nous proposons une ontologie qui permet de raisonner et de comparer les surfaces interactives de l'état de l'art et d'en imaginer de nouvelles, puis d'identifier les services logiciels nécessaires à leur mise en œuvre.

Introduction

Le domaine de l'Interaction Homme-Machine s'est construit avec la station de travail. Aujourd'hui, la miniaturisation des processeurs et des capteurs, la couverture planétaire des réseaux informatiques et l'irrésistible chute des prix constituent, ensemble, un terreau propice à l'innovation. Dès

lors, la vision de Marc Weiser sur l'informatique ubiquitaire (*ubiquitous computing*) est en train de prendre corps : l'Interface Homme-Machine d'un système n'est plus confinée à la seule station de travail, mais s'insère dans l'environnement (Weiser, 1991). Les frontières entre les mondes numériques et physiques s'estompent. Avec l'apparition des assistants personnels, l'utilisateur devient mobile, l'Interface Homme-Machine aussi. Ainsi, le monde, instrumenté de puces électroniques et de capteurs interconnectés, constitue-t-il un vaste champ d'opportunités pour de nouvelles formes d'interaction. Dans ce monde, les surfaces jouent un rôle prédominant.

En architecture civile, les surfaces structurent l'espace pour former des endroits, comme le hall d'une gare ou la salle de séjour, favorisant l'émergence, ou la conduite, d'activités spécifiques. De tout temps, les hommes ont utilisé des surfaces pour s'exprimer : les grottes de Lascaux, la Pierre de Rosette, les fresques et tableaux d'art. Plus ordinaire, un mur public couvert de graffiti, le feuillet annoté d'un livre, le tableau d'école ou la table d'un café. Pour les technologies numériques, l'écran reste le conduit informationnel privilégié. Chacune de ces surfaces a une finalité et des qualités interactionnelles : l'une tient dans la main, l'autre ne se transporte pas. Certaines sont déformables et pliables, d'autres sont rigides. L'une est pérenne, l'autre jetable. Les unes servent de canevas à peindre, d'autres s'animent de pixels numériques. En somme, les surfaces sont répandues et entretiennent avec nous des relations privilégiées, et notamment des relations d'interaction : toute surface s'appréhende par les sens, se manipule par nos actes moteurs et sert un objectif.

Dans cet article, nous proposons d'explorer les surfaces sous l'angle de l'Interaction Homme-Machine, reprenant à notre compte les motivations du mouvement de recherche initié en Réalité Mixte (Wellner *et al.*, 1993) : les surfaces physiques nous sont familières : le calcul numérique n'est pas palpable mais constitue une puissance fonctionnelle, en théorie, illimitée. L'alliance des mondes physique et numérique doit donc offrir des perspectives originales et utiles. Dans ce contexte, nous proposons d'appeler *surface interactive* toute surface physique reliée à des capacités de calcul. L'écran usuel de nos stations de travail répond à la définition. Le Bureau Digital (Wellner, 1993) et le Tableau Magique (Bérard, 1999 ; Crowley *et al.*, 2000) de la figure 1, aussi.

Pour apprécier les différences et points communs entre surfaces interactives, il convient en premier lieu d'en comprendre la nature. Une approche à la compréhension d'un nouveau problème est l'élaboration d'une ontologie capable d'offrir une structure systématique au raisonnement. Dans la section qui suit, nous présentons une ontologie qui identifie les éléments clefs d'une surface interactive : la surface, l'instrument et leurs relations. Chacun de ces éléments fait l'objet d'une section illustrée d'exemples représentatifs de l'état de l'art. En dernière partie de l'article, nous présentons succinctement les services logiciels requis pour la mise en œuvre de surfaces interactives.

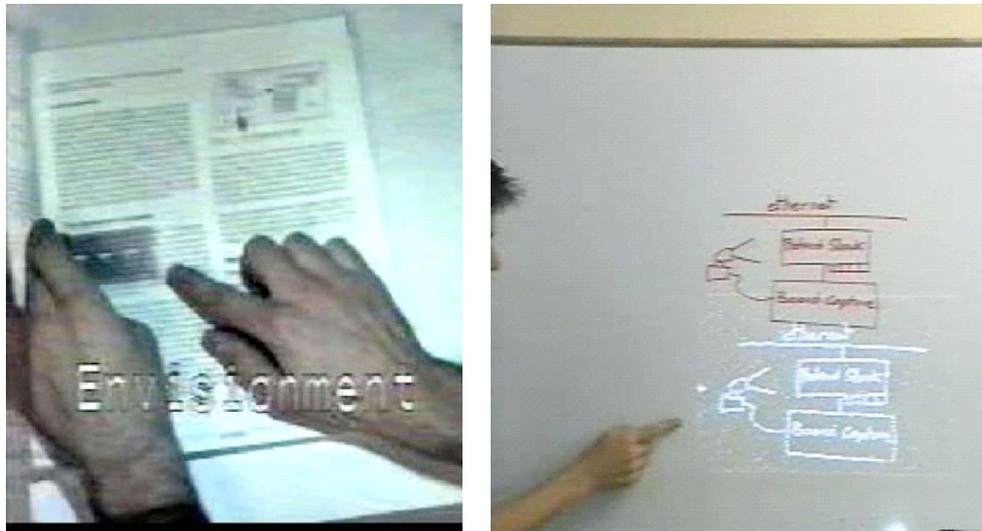


Figure 1. A gauche, le Bureau Digital (Digital Desk), exemple séminal d'étude sur les surfaces interactives (Wellner, 1993). Cette image montre une simulation où l'utilisateur sélectionne le paragraphe d'un livre. Ses deux index désignent les extrémités opposées d'un rectangle de sélection. Le système projette le rectangle de sélection sur le livre en suivant le déplacement des doigts. Une fois le texte sélectionné, le lecteur peut dupliquer le paragraphe en faisant glisser le rectangle au moyen du doigt. A droite, inspiré du Digital Desk, notre Tableau Magique (Bérard, 1999; Crowley et al., 2000) avec une interaction à un seul doigt.

(Image du Digital Desk extraite d'un film vidéo avec la permission de l'auteur.)

Surface interactive et une ontologie simplifiée

Comme le montre le schéma de la figure 2, l'interaction avec des surfaces interactives met en jeu trois classes de ressources : des ressources d'interaction (au centre de la figure), des ressources artificielles (au sommet de la figure) et des ressources naturelles (au bas de la figure).

Les ressources d'interaction servent de médiateurs entre deux types d'acteurs : les acteurs naturels comme l'Homme - mais un chat est aussi un acteur naturel, et des acteurs artificiels - dans notre cas, un système informatique. Une ressource d'interaction joue le rôle d'instrument ou de surface. En tant qu'instrument, elle sert de conduit aux actions des acteurs sur une surface. En tant que surface, elle est la partie extérieure d'un corps (solide, fluide ou gazeux) réceptacle de contenu informationnel.

Les acteurs disposent d'effecteurs pour modifier l'état des ressources d'interaction et de capteurs pour en observer l'état. Dans les exemples de la figure 1, les doigts sont les effecteurs de l'utilisateur, et ses yeux et le toucher digital lui servent de capteurs. Du côté système, l'effecteur est un projecteur vidéo tandis qu'une caméra vidéo, qui observe le mouvement des doigts de l'utilisateur, sert de capteur.

Pour calculer (raisonner et apprendre), les acteurs utilisent (et produisent) de l'information. Le contenu d'une surface dénote l'information que les acteurs artificiels et naturels partagent en situation d'interaction.

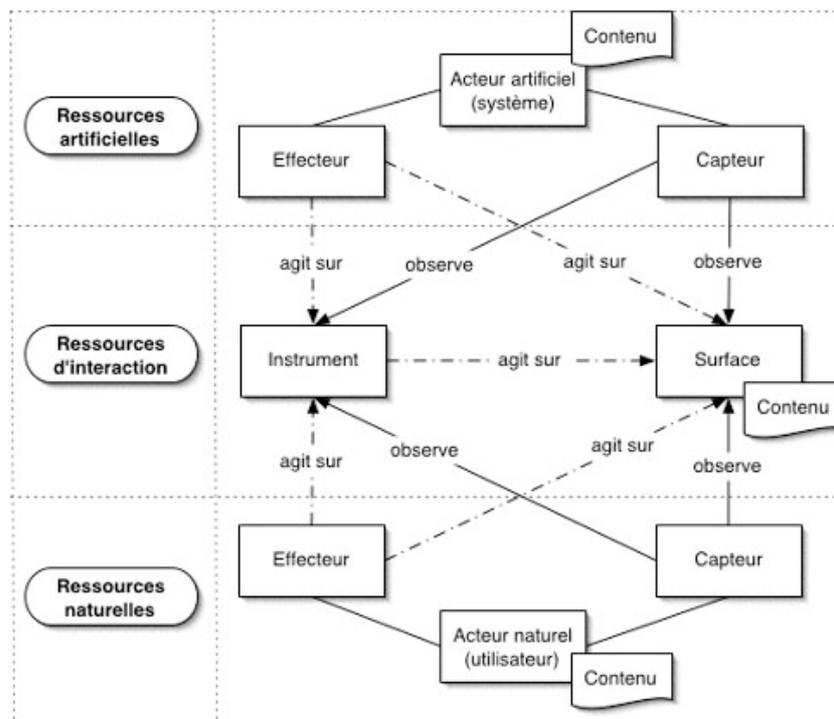


Figure 2. Ontologie pour surface interactive.

Inspiré du Modèle du Processeur Humain (Card *et al.*, 1983), notre représentation de l'acteur naturel en termes d'effecteurs, de capteurs et de contenu informationnel, est sans conteste réducteur. Mais il suffit à notre analyse. En particulier, il rend explicites deux relations, «[agit sur]» et «[observe]», dont la qualité interactionnelle dépend des caractéristiques des surfaces, des instruments et de leurs relations.

Surfaces

Les relations «*agit sur*» et «*observe*» conduisent à identifier deux catégories de surface : les surfaces d'action et les surfaces d'observation.

Surfaces d'action et surfaces d'observation

Une surface d'action est un sous-ensemble d'une surface physique sur laquelle un acteur peut agir directement avec ses effecteurs ou indirectement par le biais d'instruments. Une surface d'observation est un sous-ensemble d'une surface physique qu'un acteur peut observer au moyen de ses capteurs.

L'étude des relations entre surfaces d'action et d'observation soulève des questions de conception intéressantes. Prenons l'exemple de notre système multisurface GLOSS de la figure 3. Analysons les surfaces d'observation et d'action de la table.

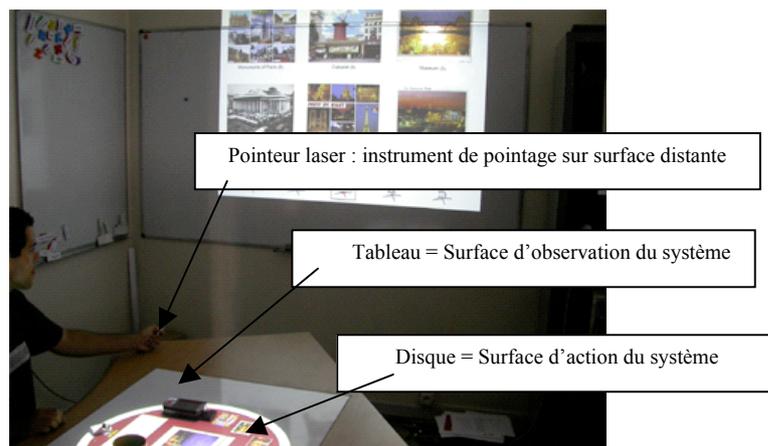


Figure 3. Système GLOSS : situation d'interaction multisurface répartie entre une table, un tableau mural, et un Assistant Personnel Numérique (PDA). L'utilisateur assis devant la table peut sélectionner le contenu du tableau mural au moyen d'un pointeur laser dont le point lumineux sur le tableau est détecté et suivi par un système de vision par ordinateur.

Comme le montre l'image de la figure 3, la surface utile de la table est une planche, imitation bois, sertie d'un tableau blanc en plastique. Suspendus au plafond au-dessus de la table, une caméra et un projecteur vidéo servent respectivement de capteur et d'effecteur système. La surface observée par le système correspond exactement à la surface du tableau. La surface d'action du système, qui correspond par définition à la couverture du projecteur vidéo, est un disque inclus dans sa surface d'observation.

Quant à l'utilisateur, ses surfaces d'action et d'observation couvrent la table. Elles incluent donc les surfaces d'observation et d'action du système. Les relations entre ces surfaces soulèvent plusieurs questions de conception. En particulier, comment l'utilisateur peut-il comprendre que, parmi les actions qu'il effectue hors du disque, certaines sont perçues par le système, d'autres pas, puisque, dans les deux cas, le système est incapable de fournir un retour d'information hors du disque? Pour ce problème, l'espace solution qui s'ouvre au concepteur est le suivant: soit utiliser une autre modalité (par exemple le son) pour étendre la surface d'action du système, ou bien modifier les relations entre les diverses surfaces d'action et d'observation en sorte qu'elles se recouvrent (comme dans l'exemple de la figure 5), ou encore compter sur les attributs et propriétés physiques des surfaces d'action et d'observation en sorte que l'utilisateur saisisse d'emblée leurs relations et donc leur usage¹. Cette dernière option nous conduit à l'analyse des attributs et propriétés des surfaces et de leurs relations².

Attributs d'une surface

Dans le contexte de notre approche fondée sur le monde réel, les caractéristiques physiques d'une surface s'imposent comme fondement. Nous proposons cette liste non exhaustive d'attributs :

- La forme géométrique: sphère, polygone (telle la table du système GLOSS), visage (par exemple, comme HyperMask³, un masque blanc sur lequel on projette des expressions produites par ordinateur), etc.
- La taille: l'étendue de la forme
- Le poids: une surface lourde ne peut être déplacée aisément ;
- La matière : les matériaux constitutifs de la surface (bois, tissus, plâtre, plastique, eau, vapeur, etc.)
- La texture: uniforme ou irrégulière
- L'usage social: surface publique, privée, semi-privée.

Selon les besoins des modèles système, les attributs ci-dessus seront représentés de manière numérique ou symbolique. Quelle que soit l'option choisie, ces attributs permettent de déduire, pour une surface donnée, ses modalités d'observation et d'action

¹ Gibson, dans sa théorie de la psychologie écologique, parle d'*affordance* ou d'intuit pour désigner ce phénomène (Gibson, 1986).

² Un attribut d'entité est une caractéristique intrinsèque de l'entité alors qu'une propriété est une aptitude de l'entité à remplir une fonction. Une propriété se déduit des attributs et s'exprime, par exemple, sous la forme d'un prédicat sur les attributs.

³ Pour une description de Hypermask : <http://web.media.mit.edu/~pinhanez/>

- Les modalités d'observation désignent les sens (capteurs) nécessaires à l'observation du contenu de la surface □ pour l'acteur naturel, il s'agit de la vue, de l'ouïe, du toucher, du goût et de l'odorat □ dans le cas de l'acteur artificiel GLOSS (cf. Figure 3), la modalité d'observation s'appuie sur la vision par ordinateur.
- Les modalités d'action couvrent les classes d'action applicables à la surface comme écrire, plier, porter, déplacer, etc. Dans le cas du système GLOSS, la table est déplaçable, le PDA peut être pris dans la main et le tableau mural, tout comme le tableau serti de la table, peuvent recevoir des inscriptions.

Les modalités d'observation et d'action se traduisent en propriétés qui, à leur tour, servent utilement le processus de conception, de développement et d'évaluation de surfaces interactives. En voici quelques exemples.

Propriétés d'une surface

La *solidité/fluidité/nébulosité* de la surface se déduit de la matière qui la constitue. Liquide ou vapeur, elle est de nature éphémère, mais on peut la traverser. Par exemple, dans (Koleva *et al.*, 2000), un rideau d'eau sur lequel des images sont projetées sert de passage entre des mondes virtuels et réels. Une surface solide ne se traverse pas sans instrument.

La *rigidité/souplesse* d'une surface exprime sa capacité à changer de forme et de taille. Une surface rigide est, si elle est incassable, de forme immuable. Une surface souple peut être pliée ou, au contraire, déroulée. Élastique, elle peut être étirée puis relâchée pour reprendre sa forme initiale. Déformable comme la pâte à modeler, elle peut être reconfigurée à façon. Les surfaces interactives actuelles sont le plus souvent rigides : le Bureau Digital (Wellner, 1993), les tables et tableaux augmentés de iRoom (Winograd, 2001 □ Johanson 2002) et de i-LAND (Streitz *et al.*, 1999 □ Streitz *et al.*, 2001) (cf. Figures 9 et 10), de même les surfaces augmentées de (Rekimoto *et al.*, 1999) (cf. Figure 4) ou notre Tableau Magique et Table Magique (cf. Figures 1 et 7). On notera l'exception du papier électronique développé initialement au MIT et à Xerox PARC ⁴, de même que les tissus augmentés du studio créatif de France Télécom R&D (Deflin *et al.*, 2002) ou les fibres électroniques du projet FiCom (<http://www.fibercomputing.net>) qui offrent des surfaces pliables et enroulables. L'Illuminating Clay est aussi un exemple original (Piper *et al.*, 2002) : l'utilisateur donne forme à de l'argile supposée représenter un modèle 3D d'un terrain. La surface est observée par un capteur de type

⁴ L'encre électronique (par exemple, le procédé Gyricon de Xerox) est constituée de billes bicolores portant une charge électrique différente sur chaque côté. Une bille est l'équivalent du pixel des écrans usuels. Prises en sandwich entre deux films de plastique couverts d'une matrice d'électrodes, les billes tournent sur elles-mêmes selon la direction du champ électrique auquel on les soumet. Ce faisant, elles montrent l'une des deux faces colorées.

scanner et un projecteur vidéo affiche sur la surface des informations pertinentes pour l'utilisateur (forme des flux aériens, courbes de niveau, etc.).

L'*opacité/transparence* d'une surface constitue également une propriété intéressante. Une surface transparente s'enrichit des informations environnementales. La transparence favorise l'ouverture tout en formant une frontière. Le Clearboard est un premier exemple d'utilisation de surfaces transparentes en communication interpersonnelle médiatisée : deux utilisateurs distants ont l'impression de se voir à travers une vitre qui sert à l'un et l'autre, de surface de dessin (Ishii *et al.*, 1992). Aujourd'hui, disponibles sur le marché, les vitrines de magasin s'animent d'une simple pitchette⁵.

L'*hétérogénéité* d'une surface peut favoriser le partitionnement de la surface en zones d'actions et d'observation. Par exemple, l'hétérogénéité de la table de la figure 3 peut inciter l'utilisateur à exploiter la partie en bois comme surface d'entrepôt (papier, stylo, tasse à café), le tableau serti comme surface pour écrire et la surface éclairée du disque comme surface d'échange (action et observation) avec le système. Encore faut-il vérifier ces hypothèses d'affordance par l'évaluation expérimentale.

Inscriptibilité/effaçabilité : inscriptible, la surface peut recevoir des informations éventuellement effaçables. Ces deux propriétés permettent de traduire qu'il est socialement incorrect de produire des inscriptions à l'encre physique sur un mur public. Mais, il sera admis d'afficher sur un mur public des inscriptions numériques, à la manière des publicistes, des spectacles son et lumières ou encore des murs animés par le mouvement des passants et spectateurs (Maynes-Aminzade *et al.*, 2002).

On pourra également s'intéresser à la *réfraction* et *réflexion* d'une surface qui expriment la *lisibilité* des inscriptions.

La *mobilité* désigne la capacité de la surface de se mouvoir (tel un écran monté sur un bras robotique) ou d'être mue. Une petite surface rigide, allongée et légère tient dans la main. Dès alors, elle peut aussi servir d'instrument de pointage.

L'*accessibilité* indique si la surface est atteignable. Trop haute, elle ne peut être utilisée comme surface d'action, car non accessible aux effecteurs de l'acteur.

⁵ Voir par exemple, les vitrines intelligentes de <http://www.i-vibrations.com/> : vitrage doté de deux paires de transducteurs piézoélectriques activables par de légers chocs.

Relations entre surfaces

La *topologie* des surfaces est fondamentale puisqu'elle exprime l'organisation de l'espace. Fondés sur la topologie, nous proposons le *couplage* de surface et la *compatibilité* entre surfaces.

Topologie

Dans le contexte de notre étude, la topologie définit les position et orientation d'entités dans un système de référence. Les entités d'intérêt incluent les acteurs, les surfaces et les instruments. Si l'on concentre l'étude sur les surfaces, on constate dans l'état de l'art que les relations spatiales entre surfaces importent. Dans l'exemple des surfaces augmentées de la figure 4, tout comme dans BUILT-IT (Rauterberget *al.*, 1998) les représentations graphiques des concepts du domaine dépendent de l'orientation de la surface cible – un même concept est représenté en 3D sur une surface verticale (le tableau mural et le PC portable), et en 2D sur une surface horizontale (la table).



Figure 4. Les surfaces augmentées de (Rekimoto et al., 1999). L'utilisateur transfère des objets numériques entre son ordinateur portable dont la position est détectée par un système de vision, et une table. A droite, un "anchored link" matérialise le prolongement de la souris du portable sur la table.

(Images extraites d'un film vidéo avec l'autorisation de l'auteur).

Dans l'exemple de la figure 5, placer le PDA à proximité du tableau mural et appuyer sur un bouton dédié du PDA entraîne l'échange d'information du PDA vers le tableau mural en l'emplacement dénoté par la position du PDA. La détection de la proximité des deux surfaces définit la nature de leur couplage.

Couplage

Des *surfaces sont couplées* lorsque le changement d'état de l'une influence l'état de l'autre. Nous venons de citer l'exemple de la figure 5 où l'action effectuée sur le PDA a un impact direct sur le contenu de la surface à proximité. Un autre exemple est la maintenance de contraintes spatiales entre les surfaces d'action utilisateur et système. Dans les classes modernes de cours, les enseignants disposent de tableaux muraux montés sur glissières sur lesquels des transparents sont projetés. Pendant le cours, l'enseignant ajoute des inscriptions à la craie en surimpression. Ce double support (tableau, transparents projetés) associe élégamment structure et opportunisme dans le processus pédagogique. Toutefois, lorsque le tableau est déplacé, les inscriptions physiques ne sont plus couplées au contenu du transparent qu'elles sont supposées compléter. On souhaiterait ici un fort couplage entre la surface d'action du système et celle de l'utilisateur en sorte que les transparents projetés suivent les inscriptions physiques. Dans cet exemple, le système, qui ne dispose pas de capacité d'observation, est incapable d'ajuster dynamiquement sa surface d'action à celle de l'utilisateur. Le projecteur vidéo de (Pinhanez, 2001), qui utilise un miroir rotatif pour détourner la sortie vidéo d'un PC sur différentes surfaces, offrirait une solution intéressante à notre problème.

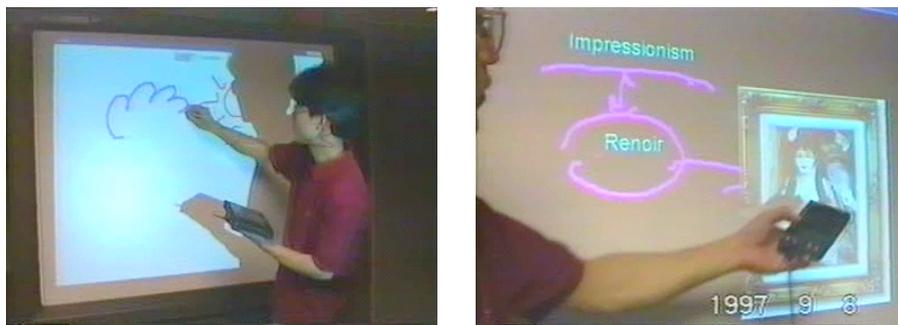


Figure 5. Exemple de mise en œuvre de la métaphore du peintre. Surface mobile, de petite taille et légère, le PDA fait office de palette. Le tableau tactile de grande taille et fixe sert de feuille à dessin. Ici, les surfaces d'action et d'observation du système recouvrent exactement les surfaces d'action et d'observation de l'utilisateur (Rekimoto, 1997). A droite, l'utilisateur vient de transférer l'image d'un tableau de Renoir en l'emplacement du tableau mural désigné par la position du PDA.

(Images extraites d'un film vidéo avec l'autorisation de l'auteur).

Compatibilité

La *compatibilité* entre surfaces permet d'envisager diverses formes d'usage conjoint, par complémentarité, par redondance, par équivalence, par assignation.

- La métaphore du peintre qu'illustre la figure 5, montre un exemple de deux surfaces utilisées en *complémentarité* : comme l'artiste peintre, l'utilisateur tient dans la main non dominante sa palette d'outils et dessine sur le tableau mural avec sa main dominante. Un stylet lui sert d'instrument pour sélectionner l'outil sur la palette et dessiner sur le tableau. Dans cet exemple, la complémentarité tient fondamentalement aux différences de taille et de poids entre les deux surfaces. La complémentarité peut aussi s'appuyer sur la similitude des surfaces pour produire de nouvelles fonctions. C'est le cas des Data Tiles illustrées dans la figure 6. Notons que la topologie des tuiles définit la sémantique de la composition. De même, on pourrait construire un écran plus grand en formant une mosaïque de PDA placés côte à côte.



Figure 6. Les DataTiles (Rekimoto, 2001) se présentent sous la forme de petites tuiles transparentes que l'utilisateur dispose sur une table et sur lesquelles des informations sont rétro-projetées. Chaque tuile est identifiée et joue un rôle particulier (curseur, carte géographique, etc.). L'utilisateur peut les composer, par exemple placer la tuile "météo" sur la tuile "ligne du temps" pour découvrir le temps qu'il fera demain : la topologie des tuiles est un véhicule sémantique.

(Images extraites d'un film vidéo avec l'autorisation de l'auteur).

- L'usage en *redondance* de surfaces revient à utiliser plusieurs surfaces simultanément pour y effectuer les mêmes classes de tâches. L'exemple usuel est la connexion d'un tableau numérique tactile de type SmartBoard. Dès lors, l'Interface Homme-Machine de l'application est dupliquée sur le tableau numérique et l'écran de la station.

- L'usage en *équivalence* de surfaces consiste à les utiliser de manière alternée pour accomplir une classe de tâches donnée. Par exemple, il devient courant d'utiliser un même service via une station de travail, un PDA, ou un téléphone portable (de type WAP ou Imode). L'IHM de ce service est généralement adaptée à la taille de chaque surface pour répondre aux requis de plasticité (Thevenin *et al.*, 1999 □ Calvary *et al.*, 2001), mais sur le plan fonctionnel, l'utilisateur dispose du même éventail de possibilités.
- L'*assignation* dénote l'affectation immuable de surfaces à un rôle (ou ensemble de fonctions). Par exemple, l'édition d'informations personnelles est assignée au PDA d'usage privé, alors que l'édition coopérative d'un document est assignée au tableau mural public.

Nous avons analysé les surfaces. La section qui suit traite des instruments.

Instruments

Un instrument est un objet physique qui permet à un acteur d'agir sur l'état d'une surface. En Interaction Homme-Machine usuelle, le clavier et la souris sont les instruments privilégiés de l'acteur humain. Avec les *interfaces saisissables* (Graspable User Interfaces), tout objet physique, sous réserve qu'il tienne dans la main et qu'il soit observé par le système, peut aussi servir d'instruments (Fitzmaurice *et al.*, 1995).

Les exemples cités concernent les instruments utiles à l'acteur humain. Or, comme le montre notre ontologie, un acteur artificiel peut aussi agir sur un instrument. L'*Actuated Workbench* en est un exemple (Pangaro *et al.*, 2002) □ la surface de l'établi recouvre une matrice d'unités électromagnétiques mesurant chacune 1,9cm de diamètre sur 3,8 cm de hauteur. La matrice permet au système de déplacer des objets aimantés sous l'effet du champ magnétique.

Attributs et propriétés d'un instrument

Comme pour les surfaces, les instruments ont des attributs et des propriétés dont l'analyse est utile dans le processus de développement de surfaces interactives.

Pour l'essentiel, les attributs d'un instrument incluent □ la forme, la taille, le poids, le matériau, l'usage social (personnel, partageable, semi-privé). De ces attributs se déduisent, comme pour les surfaces, les modalités d'observation (toucher, vue, etc.) et d'action □ (écriture d'inscriptions numériques, écriture d'inscriptions physiques, sélection, déplacement, déformation, etc.). Il en va de même pour les propriétés □ dont la mesure dépend de la fonction attendue de l'instrument. Par exemple, pour un instrument de pointage, la précision et la stabilité sont des facteurs

essentiels. Un pointeur laser est peu précis (Myers *et al.*, 2002), mais, comme le montre la figure 3, il permet de sélectionner des informations sur une surface distante.

Relations entre instruments

Comme pour les surfaces, on observe des relations de *topologie*, de *couplage* et de *compatibilité* entre instruments. La figure 7 montre un exemple de couplage entre les jetons de notre Table Magique.



Figure 7. La Table Magique. Les instruments sont des jetons en plastique de couleur. Deux jetons sont couplés en les mettant en contact. Dès lors, ils permettent de sélectionner des inscriptions numériques ou physiques en les éloignant l'un de l'autre, puis, comme le montre la figure, d'appliquer simultanément des rotations et des changements de taille aux inscriptions sélectionnées. Le couplage prend fin lorsque l'un des jetons est masqué par la main.

Nous avons jusqu'ici centré l'analyse des relations spatiales, de couplage et de compatibilité entre surfaces puis entre instruments. Il nous reste à étudier les relations de type surface-instrument-effecteur, voire les relations surface-instrument-capteur.

Association effecteur, instruments et surfaces □ Association directe et multiplexage temporel et spatial

D'après notre ontologie de la figure 2, un effecteur peut agir sur un instrument ou sur une surface. Mais un instrument peut aussi agir sur une surface au point d'en changer les propriétés. Par exemple, le «[soundbug](#)»

permet de transformer un mur ou une porte en haut-parleur⁶. Dans la suite de l'exposé, nous limitons notre analyse aux effecteurs mains et doigts et considérons leurs associations aux instruments, aux concepts et aux fonctions-système. Ces liens se distinguent par leur caractère direct, par la nature du mutiplexage, et par la spécialisation des instruments au regard de la sémantique des fonctions et concepts du système.

Caractère direct des associations effecteur-instrument-surface

La figure 8 montre trois niveaux de couplage entre effecteurs, instruments et surface : niveau de couplage dans les interfaces graphiques classiques, dans les interfaces saisissables (fondées sur la manipulation d'instruments) et dans les interfaces digitales (fondée sur l'utilisation des doigts).

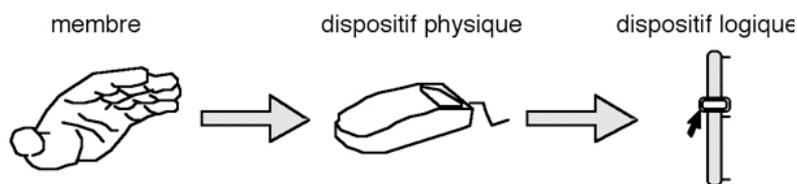
- En interface graphique classique, l'utilisateur doit acquérir la souris avec la main, puis acquérir sur la surface avec le pointeur de la souris, la représentation numérique d'une fonction ou concept-système (par exemple une barre de défilement).
- Dans le cas d'une interface saisissable, l'association entre un instrument et une fonction (ou concept) du système se crée en posant l'instrument sur la représentation de cette entité sur la surface. Une seule acquisition est nécessaire, car l'instrument saisi contrôle de manière directe l'entité du système. Les briques de Fitzmaurice en sont l'exemple type (Fitzmaurice *et al.*, 1995). Les briques du *Senseboard* offrent une association originale pour des tâches de tri d'information (Jacob *et al.*, 2002) : chaque brique, identifiée par RFID (Radio Frequency Identifier), se déplace à la main sur les cases fixes d'une surface grillagée à la manière d'une feuille de tableur. Chaque brique représente une unité d'information (par exemple un document) dont la représentation est projetée sur sa surface. Dans ce système, une brique sert donc à la fois d'instrument et de surface.
- Avec une interface digitale, l'instrument est supprimé. La main (ou le doigt) contrôle directement l'entité-système représentée sur la surface. Le Bureau Digital et le Tableau Magique illustrent cette situation. Ces deux systèmes utilisent une caméra vidéo pour observer les doigts sur une table, c'est-à-dire sur une surface ordinaire. Avec le capteur Smartskin, la surface est spécialisée, mais évite le problème des occultations : une grille d'électrodes capte la position de mains sur la surface et de même la distance à la surface (Rekimoto, 2002). Les interfaces manipulatoires, qui s'appuient sur l'analogie avec les gestes effectués dans le monde réel, en sont un autre exemple : l'utilisateur, qui tient la surface dans la main,

⁶ Le Soundbug, de la taille d'une souris, se fixe sur une surface plane au moyen d'une ventouse et se branche sur la sortie audio d'un calculateur, CD-player, etc.
<http://www.soundbug-us.com>

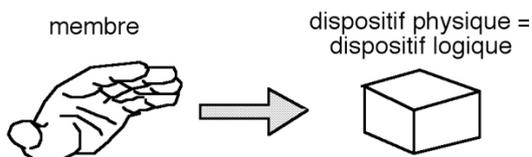
provoque un défilement du contenu de la surface en l'inclinant légèrement (Harrison, 1998).

- Enfin, l'effecteur humain est directement lié à l'état du système comme dans le cas de la fenêtre perceptuelle (Bérard, 1999).

Interface graphique classique



Interface saisissable



Interface digitale



Figure 8. Exemples de couplage entre l'effecteur main (ou doigt), un instrument et un contenu de surface □ interface graphique classique, interface saisissable et interface digitale (Bérard, 1999).main.

En somme, il existe plusieurs manières de réduire les intermédiaires entre les effecteurs humains et le contenu numérique d'une surface □ suppression du dispositif logique dans le cas des interfaces saisissables et suppression de l'instrument dans le cas des interfaces digitales.

Multiplexage spatial et temporel des associations

Le multiplexage est un procédé pour répartir l'activation des fonctions d'un système. Les interfaces graphiques usuelles appliquent, avec la souris,

un multiplexage temporel alors que les interfaces saisissables pratiquent, en général, le multiplexage spatial (Fitzmaurice, 1996).

Le *multiplexage temporel* correspond à une activation séquentielle des fonctions du système. Le pointeur de la souris, qui ne désigne, à un instant donné, qu'un seul emplacement de l'écran, ne permet d'activer qu'une fonction à la fois. L'activation d'une fonction avec la souris (par exemple, le déplacement d'une fenêtre) est marquée par l'association du curseur à la représentation graphique de la fonction sur la surface. Cette association s'exprime par la position du curseur conjointe à l'enfoncement du bouton de la souris. Elle cesse avec le relâchement du bouton. La souris est alors disponible pour l'activation d'une autre fonction.

Le *multiplexage spatial* désigne le partage, à un instant donné, de l'espace entre plusieurs entités. Dans notre contexte, le multiplexage spatial se traduit par la présence simultanée de plusieurs représentations de concepts et fonctions-système sur la surface : les boutons, barres de titre des fenêtres, barres de menu et poignées de contrôle se répartissent l'espace d'affichage. Ces représentations offertes simultanément à l'activation sont, avec la souris, utilisées en séquence. Le potentiel de simultanéité n'est pas exploité. Autrement dit, le multiplexage spatial du rendu graphique est bridé par le multiplexage temporel de la souris.

Les interfaces saisissables, dont le fondement est l'association d'un instrument distinct à chaque fonction, permettent d'agir sur plusieurs fonctions numériques simultanément. En pratique, à un fin niveau de granularité temporelle, les instruments sont multiplexés spatialement : chaque instrument a une fonction bien définie. À un niveau de granularité temporel plus large, il est possible d'attacher et de détacher les instruments. On multiplexe ainsi leur fonction dans le temps.

Le multiplexage spatial favorise l'interaction à deux mains. L'utilisateur peut envoyer des ordres au système par l'intermédiaire de deux flux parallèles, accroissant ainsi le débit d'information à destination du système. La Table Magique est un exemple d'interaction à deux mains.

Spécialisation/Généralité des instruments

Un instrument est général lorsqu'il peut être associé à différentes classes de concepts et fonctions. La souris, les jetons de la Table Magique, et les briques de Fitzmaurice sont des instruments généraux.

Un instrument est spécialisé lorsqu'il est dédié à une classe, voire à une instance de fonction ou concept-système. Le MetaDESK utilise des instruments spécialisés (Ullmer *et al.*, 1997) : la réplique miniature du bâtiment principal (le Dôme) du Massachusetts Institute of Technology (M.I.T.). En posant la réplique sur le MetaDESK, la carte du campus du M.I.T apparaît centrée sur la position de l'instrument. La carte peut ensuite être déplacée et pivotée par translation et rotation de la miniature. En

plaçant une autre miniature sur la carte (le bâtiment du MediaLab dans l'exemple du MetaDESK), l'utilisateur contrôle le facteur d'échelle de la carte : les emplacements des deux bâtiments, Dôme et MediaLab, sont maintenus en permanence par le système sous leur miniature respective.

Les instruments spécialisés, qui fonctionnent par analogie de forme avec les concepts qu'ils permettent de manipuler, sont appelés des "phicônes" (pour "PHysical ICON" ou "icône physique") (Ishii, 1997). Les phicônes peuvent également jouer le rôle de récipient enregistreur : la miniature du Dôme pourrait être prêtée à une autre personne qui pourrait alors consulter la carte du M.I.T. sur un système différent. Cette idée d'instrument enregistreur se retrouve dans le concept de Passage de i-LAND illustré dans les figures 9 et 10 (Konomi *et al.*, 1999).

Les instruments spécialisés, représentations tangibles de concepts et de fonctions numériques, visent à favoriser la compréhension du fonctionnement du système. Cette voie est aujourd'hui largement explorée pour la création d'environnements interactifs, par exemple, par des enfants (Montemayor, 2002). Mais, contrairement aux instruments généraux, les instruments spécialisés ne sont pas réutilisables. En conséquence, ils ne soutiennent pas le facteur d'échelle lorsque le nombre de concepts et fonctions-système à manipuler devient grand. À l'évidence, il convient de raisonner sur le compromis entre les extrêmes □ instrument général et instrument spécialisé.

Ayant décrit les différentes formes de surfaces interactives, il convient maintenant d'analyser les implications sur la mise en œuvre logicielle.

Requis logiciels

Les logiciels de base pour les Interfaces Homme-Machine, c'est-à-dire les gestionnaires de fenêtres (Window Manager) et les boîtes à outils, sont tous réalisés sur la base d'hypothèses implicites. Il en résulte des modèles, sans aucun doute efficaces, mais trop simplistes pour répondre aux requis des surfaces interactives. Nous résumons ci-dessous ces constats avant d'esquisser quelques propositions.

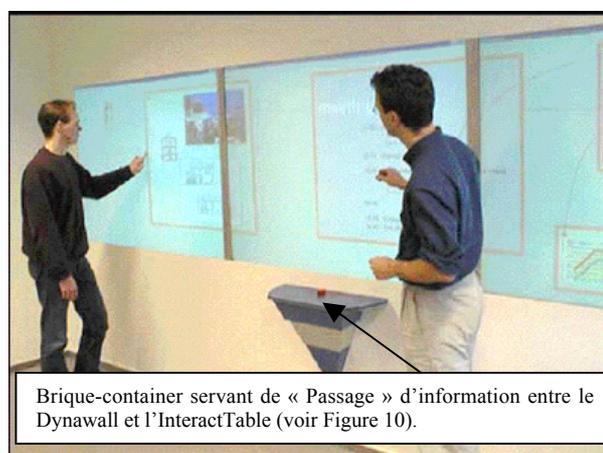


Figure 9. Le DynaWall de i-LAND (Streitz et al., 1999; Streitz et al., 2001). Un capteur de pression placé dans la tablette détecte la présence du Passage.
(Image extraite d'un film vidéo avec l'autorisation de l'auteur)

L'offre actuelle □ *les insuffisances*

Les gestionnaires de fenêtres modélisent les fenêtres sous forme de «*drawables*» dont les côtés sont parallèles aux bords de l'écran. Ce faisant, le requis d'IHM rotative du système GLOSS et de l'InteractTable (cf. Figures 3 et 10), ne peut être satisfait directement. La boîte à outils Jazz/PAD++ (Bederson *et al.*, 2000), implémentée en Java2D, fournit les bases pour la mise en œuvre d'IHM rotatives et zoomables.

La plate-forme d'interaction est supposée comprendre au plus un instrument de pointage et un clavier. S'il est possible de connecter physiquement plusieurs souris, toutes sont répertoriées avec le même identifiant. Dans ces conditions, la réalisation d'applications comme KidPad (Benford *et al.*, 2000), où chaque utilisateur dispose d'une souris pour agir sur une même surface, nécessite de revisiter le modèle d'événement comme dans MID (Hourcade *et al.*, 1999) en sorte que chaque instance de souris soit identifiée de manière unique.

Si le modèle graphique des gestionnaires de fenêtres autorise la connexion de plusieurs écrans physiques, la topologie des écrans est limitée à un espace plan (en haut, en bas, à droite, à gauche) et de plus, le système est incapable de découvrir cette topologie sans l'intervention explicite de l'utilisateur. Les mises en œuvre des surfaces augmentées de Rekimoto, du système GLOSS et de i-LAND, qui nécessitent une topologie 3D, sont, dans ces conditions, difficiles.

Logiciel de base de l'IHM pour surfaces interactives – *agenda de recherche*

Nous proposons un programme de recherche réparti en trois niveaux d'abstraction : algorithmes et techniques d'observation et d'action de base, extension du gestionnaire de fenêtres, extension des boîtes à outils.

Techniques d'observation et d'action

Jusqu'ici, l'utilisateur utilisait des instruments au fonctionnement fiable (souris, clavier) qu'il actionnait de manière explicite. En outre, la manipulation des surfaces physiques n'était pas observée. Aujourd'hui, le système doit en plus être capable d'observer les actions implicites (actions de l'utilisateur, événements pertinents produits dans l'environnement), voire agir sur des instruments et surfaces au moyen de nouveaux types d'effecteurs (Cf. l'Actuated Workbench).

Or, l'observation se fait au moyen de capteurs dont les données sont incertaines. Par exemple, la détection et le suivi du doigt de la Table Magique, tout comme le suivi des jetons de la Table Magique doivent répondre à des critères de temps de latence, de stabilité et de précision (Bérard, 1999). La détection du changement d'orientation d'une surface, ou son déplacement dans l'espace, met en jeu des algorithmes de localisation encore non maîtrisés.

Toutes ces techniques constituent des pilotes de base fournisseurs et consommateurs d'événements échangés avec le niveau gestionnaire de fenêtre.

Extension du niveau gestionnaire de fenêtres

Le gestionnaire de fenêtres étendu (ou revisité) doit modéliser la notion de surface et d'instrument. Surfaces et instruments doivent pouvoir apparaître et disparaître dynamiquement de la plate-forme. Le système doit donc être muni d'un service de découverte et de gestion dynamique des ressources d'interaction. L'arrivée et le départ de ressources d'interaction impliquent aussi la capacité de faire et défaire les associations dynamiquement. ICON va dans ce sens (Dragicevic *et al.*, 2001). Ce système permet par exemple de spécifier qu'un « clic souris » en un point d'une surface est simulé par la pause du faisceau d'un pointeur laser en ce point pendant N ms.

La configuration des ressources, si elle est maintenue par ce niveau de service, doit être accessible aux niveaux d'abstraction supérieurs clients, en sorte que l'IHM soit adaptée en conséquence.

Surfaces, instruments et utilisateurs ont entre eux des relations spatiales qui importent. Toute modification de la topologie doit donner naissance à un événement en sorte que le niveau d'abstraction supérieur client ajuste l'IHM.

Extension du niveau boîte à outils

Les exemples de la littérature appellent deux requis relevant du niveau boîte à outils : la répartition de l'IHM et sa migration dans l'espace des surfaces disponibles.

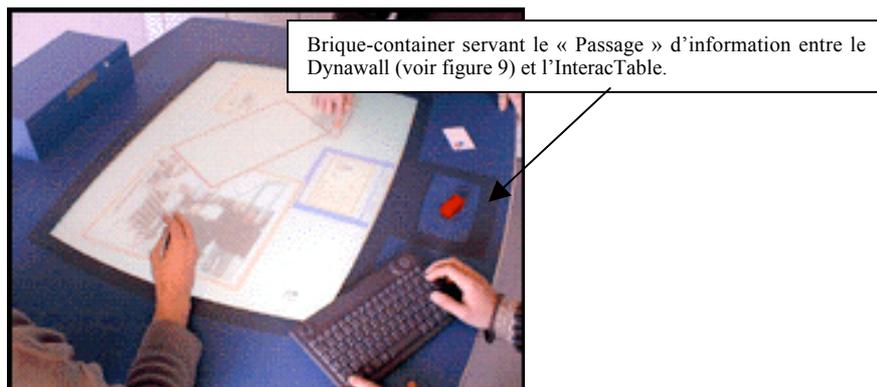


Figure 10. L'InteractTable, de i-LAND et son IHM rotative (Streitz et al., 1999 ; Streitz et al., 2001).

(Image extraite d'un film vidéo avec l'autorisation de l'auteur)

L'unité de répartition d'une IHM sur des surfaces interactives peut être l'application, l'espace de travail, le concept du domaine, ou le pixel :

- Le grain « application » correspond au cas des surfaces compatibles permettant un usage conjoint par équivalence ou par redondance (cf. section relative aux propriétés des surfaces) : l'IHM est répliquée sur les surfaces au problème de plasticité près : si les surfaces sont de tailles très différentes (PDA et écran de PC), l'IHM peut requérir une adaptation, mais conserve l'équivalence fonctionnelle.
- Le grain « espace de travail » répond au cas des surfaces compatibles permettant un usage complémentaire (cf. la métaphore du peintre de la figure 5) : l'unité de répartition de l'IHM est un espace de travail. On appelle « espace de travail », un ensemble d'interacteurs (ou widgets) qui permet à l'utilisateur d'accomplir un ensemble de tâches logiquement connectées. En IHM graphique, un espace de travail correspond le plus souvent à une fenêtre, à un canevas ou à des palettes d'outils.
- Au niveau « concept du domaine », le grain de répartition correspond à des concepts du domaine. Dans l'exemple des surfaces augmentées de la figure 4, les objets (en l'occurrence, des meubles d'appartement) sont répartis entre les surfaces.

□ Au niveau le plus fin, le pixel, l'IHM peut se trouver à cheval sur plusieurs surfaces. Le DynaWall en est un exemple (voir Figure 9) : une fenêtre peut chevaucher sur deux tableaux au gré des gestes des utilisateurs.

La répartition de l'IHM peut être statique, c'est-à-dire décidée par le concepteur, ou dynamique. Dans ce dernier cas, l'IHM a des capacités de migration. Si l'unité de migration est l'un des quatre grains cités ci-dessus, la migration proprement dite ne peut se faire qu'en des points précis qui nécessitent chacun des mécanismes de sauvegarde d'état et de reprise spécifiques. Nous proposons les points de migration suivants :

- Migration au niveau de la session : ce cas revient à une répartition statique de l'IHM.
- Migration au niveau de la tâche-utilisateur : ce grain implique que l'utilisateur recommence la tâche si la migration a lieu en cours de tâche.
- Migration au niveau des actions physiques utilisateur : le cas idéal qu'illustrent les systèmes i-LAND, les surfaces augmentées de Rekimoto et la métaphore du peintre.

Au-delà des mécanismes de sauvegarde et de reprise, la migration d'IHM pose le problème de l'évaluation, par l'utilisateur, du phénomène de migration. Pendant la migration, l'IHM se trouve dans un état transitoire. Or cet état doit être explicité auprès de l'utilisateur sous peine de transgresser les règles et principes ergonomiques de l'Interaction Homme-Machine. S'il existe des solutions connues en interaction centralisée (par exemple en graphique, les formes élastiques asservies au pointeur de la souris), il n'en va pas de même avec les surfaces interactives. Il nous faut inventer des *IHM de transition* d'utilité générale (Barallon, 2002). L'*anchored link* de la figure 4, trait qui lie des objets situés sur des surfaces distinctes, est un exemple d'IHM de transition.

Le programme de recherche que nous venons d'esquisser est partiellement couvert par des développements récents : les systèmes iROS (Winograd, 2001) et BEACH (Tandler, 2001) orientés «*roomware*», et les grands projets d'infrastructure comme Aura (Carnegie Mellon University), EasyLiving (Brumitt *et al.*, 2001) et Oxygene (MIT).

Conclusion

Nous proposons un cadre structurant pour l'analyse des nouvelles formes d'interaction que nous regroupons sous la notion de surfaces interactives. A partir d'une ontologie simple, nous sommes en mesure de qualifier, situer et comparer les solutions existantes, et d'envisager un programme de recherche pour les logiciels de base de l'Interaction Homme-Machine. Ce programme met en évidence le lien grandissant de l'Ingénierie de l'Interaction Homme-Machine avec d'une part, les techniques

d'observation et d'action développées en robotique et en perception artificielle, et d'autre part, avec les systèmes répartis et intergiciels.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier G. Rey, B. Mansoux et A. Rechenmann pour leur participation au développement des surfaces interactives du système GLOSS. Ce travail a été partiellement financé par la communauté européenne (projets GLOSS IST-2000-26070 et FAME IST-2000-28323).

Bibliographie

Barralon N. Interfaces Homme-Machine de Transition □DEA Informatique Système et Communication, Ecole Doctorale de Informatique et Mathématiques Appliquées, Institut National Polytechnique de Grenoble, Université Joseph Fourier, Juin 2002.

Bederson B., Meyer J., Good L. "Jazz: An Extensible Zoomable User Interface Graphics Toolkit in Java". In *Proceedings of User Interface Software and Technology (UIST 2000)*. ACM, May 2000. p.171-180.

Benford S., Bederson B., Akesson K., Bayon V., Druin A., Hansson P., Hourcade J., Ingram R., Neale H., O'Malley C., Simsarian K., Stanton D., Sundblad Y., Taxen G. "Designing Storytelling Technologies to Encourage Collaboration Between Young Children". In *Proceedings of the ACM conf. On Human Factors in Computer Human Interaction 2000 (CHI'2000)*, The Hague, Netherlands, April 1-6, ACM, New York, p. 556-563.

Bérard F., "The Perceptual Window: Head Motion as a new Input Stream". In *Proc. Interact99*, Edinburgh, A. Sasse & C. Johnson Eds, IFIP IOS Press Publ., 1999, p. 238-.244

Bérard F., "Vision par Ordinateur pour l'Interaction Homme-Machine Fortement Couplée". Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier, Novembre 1999 http://iihm.imag.fr/publs/1999/THESE1999_Berard.pdf

Brumitt B., Shafer, S. "Better Living Through Geometry." *Personal and Ubiquitous Computing* 2001. Vol 5.1 Springer.

Calvary G., Coutaz J., Thevenin. D. "A Unifying Reference Framework for the Development of Plastic User Interfaces". *IFIP WG2.7 (13.2) Working Conference, EHCI01*, Toronto, May 2001, Springer Verlag Publ., LNCS 2254, M. Reed Little, L. Nigay Eds, pp.173-192.

Card S., Moran T., Newell A. *The Psychology of Human-Computer Interaction*, Chap. 2. The Human Information Processor, Lawrence Erlbaum Ass. Publ., 1983.

Crowley J., Coutaz J., Bérard F. «□Things that see: Machine Perception for Human Computer Interaction□», *Communications of the ACM*, ACM, Vol 43 (3), March 2000, p. 54-64.

Deflin E., Weill A., Conkar V. «□Communicating Clothes: Optical Fiber Fabric for a New Flexible Display", *Proc. Avantex Symposium*, 13-15 Mai 2002, Frankfurt

Dragicevic P. Fekete J.-D. "Input Device Selection and Interaction Configuration with ICON". *Actes de la Conférence Internationale IHM-HCI 2001*, Cepadues, Lille, France, Springer Verlag, 2001, p. 543-448.

Fitzmaurice G., Ishii H., Buxton W. "Bricks: Laying the Foundations for Graspable User Interfaces". *In Proc. of the ACM conf. On Human Factors in Computer Human Interaction (CHI95)*, ACM, 1995, p. 442-449.

Fitzmaurice G. "Graspable User Interfaces". *PhD Thesis*, Computer Science Department, University of Toronto, 1996. Disponible sur le site : <http://www.dgp.utoronto.ca/people/GeorgeFitzmaurice/>

Gibson J.J. *The Ecological Approach to Visual Perception*. Lawrence Erlbaum Ass., Hillsdale, London, 1986.

Harrison B. L., Fiskin K. P., Gujar A., Mochon C., Want R. "Squeeze me, Hold me, Tilt Me ! An exploration of Manipulative User Interface". *In Proc. ACM conference on Computer Human Interaction (CHI98)*, ACM, p. 17-24.

Hourcade J., Bederson B. "Architecture and Implementation of a Java Package for Multiple Input Devices (MID)". 1999. Disponible à l'adresse <http://www.cs.umd.edu/hcil/mid/>

Ishii H., Kobayashi M., Grudin J. «Integration of Interpersonal Space and Shared Workspace: Clearboard Design and Experiments. *Proceedings Computer Supported Collaborative Work, CSCW 92*, ACM, Nov. 1992, p. 33-50.

Ishii H., Ullmer, B. "Tangible Bits: Towards Seamless Interfaces between People, Bits and Atoms". *In Proc. of the ACM conf. On Human Factors in Computer Human Interaction (CHI97)*, ACM, 1997, p. 234-241.

Jacob R., Ishii H., Pangaro G. Patten J. A Tangible Interface for Organizing Information using a Grid. ". *In Proc. of the ACM conf. On Human Factors in Computer Human Interaction (CHI2002)*, ACM, 2002, p. 339-346.

Johanson B., Fox A., Winograd T. "The Interactive Workspace Project: Experiences with Ubiquitous Computing Rooms", *IEEE Pervasive Computing Magazine* 1(2), April-June 2002.

Koleva B., Schnädelbach H., Benford S., Greenhalgh C. "Traversable Interfaces Between real and Virtual Worlds. *In Proc. of the ACM conf. On Human Factors in Computer Human Interaction (CHI2000)*, ACM, 2000, p. 233-240.

Konomi S., Müller-Tomfelde C., Streitz N. "Passage: Physical Transportation of Digital Information in Cooperative Buildings". *In Proceedings of the Second International Workshop (CoBuild'99), Cooperative Buildings - Integrating Information, Organizations, and Architecture*, Streitz N., Siegel J., Hartkopf V., Konomi S. (Eds.), LNCS 1670, Heidelberg, Germany, Springer, 1999. p. 45-54. ISBN 3-540-66596-X

Maynes-Aminzade D., Pausch R., Seitz S. "Techniques for Interactive Audience Participation". *In Proc. IEEE 4th International Conference on Multimodal Interfaces (ICMI02)*, Pittsburgh, Oct. 2002.

Montemayor J., Druin A., Farber A., Simms S., Churaman W., D'Amour A. "Physical Programming: Designing Tools for Children to Create Physical Interactive Environments. *In Proc. of the ACM conf. On Human Factors in Computer Human Interaction (CHI2002)*, ACM, Minneapolis, Minnesota, 2002, p. 299-306.

Myers B., Stiel H., Gargiulo R. "Collaboration Using Multiple PDAs Connected to a PC". *Proceedings Computer Supported Collaborative Work, CSCW98*, ACM, 1998, Seattle, WA. p. 285-294.

Myers B., Bhatnagar R., Nichols J., Peck C.H., Kong D., Miller D., Long C. "Interacting At a Distance: Measuring the Performance of Laser Pointers and Other Devices". *In Proc. of the ACM conf. On Human Factors in Computer Human Interaction (CHI2002)*, ACM, Minneapolis, Minnesota, 2002, p. 33-40.

Moran T., Carroll J. *Design Rationale: Concepts, Techniques, and Use (Computers, Cognition, and Work)*, Lawrence Erlbaum Publ., 1996.

Pangaro G., Maynes-Aminzade D., Ishii H. "The Actuated Workbench: Computer-Controlled Actuation in Tabletop Tangible Interfaces". *In Proceedings of User Interface Software and Technology (UIST 2002)*, ACM, 2002, p. 181-189.

Pinhanez C. "The everywhere Displays Projector: A Device to Create Ubiquitous Graphical Interfaces". *In Proc. of the 3rd International Conference on Ubiquitous Computing (UbiComp 2001)*, Atlanta Sept. 2001, Abowd G., Brumitt B. and Shafer S. Eds., Springer, LNCS 2201, p. 315-331.

Piper B., Ratti C., Ishii H. "Illuminating Clay: a 3D Tangible Interface for Landscape Analysis". *In Proc. of the ACM conf. On Human Factors in Computer Human Interaction (CHI2002)*, ACM, Minneapolis, Minnesota, 2002, p. 355-362.

Rauterberg M. et al. "BUILT-IT: A Planning Tool for Construction and Design". *In Proc. Of the ACM Conf. In Human Factors in Computing Systems (CHI98) Conference Companion*, ACM, 1998, p. 177-178.

Rekimoto J. "Pick-and-Drop: A Direct Manipulation Technique for Multiple Computer Environments". *In Proceedings of User Interface Software and Technology (UIST 1997)*, ACM, 1997, p. 31-39.

Rekimoto J., Masanori S. "Augmented Surfaces : A Spatially Continuous Workspace for Hybrid Computing Environments". *In Proc. of the ACM conf. On Human Factors in Computer Human Interaction (CHI99)*, ACM, 1999, p.378-385.

Rekimoto Y., Ullmer B., Oba H. "DataTiles: A Modular Platform for Mixed Physical and Graphical Interactions". *In Proc. of the ACM conf. On Human Factors in Computer Human Interaction (CHI2001)*, ACM, Seattle, 2001, p. 269-276.

Rekimoto Y. "Smartskin: An Infrastructure for Freehand Manipulation on Interactive Surfaces". *In Proc. of the ACM conf. On Human Factors in Computer Human Interaction (CHI2002)*, ACM, 2002, p. 113-120.

Streitz N., Geibler J., Holmer T., Konomi S., Müller-Tomfelde C., Reischl W., Rexroth P., Seitz P., Steinmetz R. "i-LAND: An interactive Landscape for Creativity and Innovation". *In Proc. of the ACM conf. On Human Factors in Computer Human Interaction (CHI99)*, ACM, 1999, p. 120-127.

Streitz N., Tandler P. , Müller-Tomfelde C. , Konomi S. "Roomware: Towards the Next Generation of Human-Computer Interaction based on an Integrated Design of Real and Virtual Worlds". *In Human-Computer Interaction in the New Millennium*, Carroll J. (Ed.), Addison-Wesley, 2001, p. 553-578.

Tandler P. "Software Infrastructure for Ubiquitous Computing Environments Supporting Synchronous Collaboration with Heterogenous Devices". *In Proc. of the 3rd International Conference on Ubiquitous Computing (Ubicomp 2001)*, Atlanta Sept. 2001, Abowd G., Brumitt B. and Shafer S. Eds., Springer, LNCS 2201, p. 96-115.

Thevenin D., Coutaz J. "Plasticity of User Interfaces: Framework and Research Agenda". *In Proc. Interact99*, Edinburgh, Sasse A. and Johnson C. Eds, IFIP IOS Press Publ. , 1999, p.110-117.

Ullmer B., Ishii H. "The MetaDESK: Models and Prototype for Tangible User Interfaces". *In Proceedings of User Interface Software and Technology (UIST 97)*, ACM, 1997, p. 223-232.

Want R., Pering T., Danneels G., Kumar M., Sundar M., Light J. "The Personal Server Changing the Way We Think about Ubiquitous Computing". *In Proc. of the 4th International Conference on Ubiquitous Computing (Ubicomp 2002)*, Göteborg Sept.-Oct. 2002, Borriello G., Holmquist L.E. Eds., Springer, LNCS 2498, p. 194-209.

Weiser M. "The Computer of the 21st Century". *Scientific American*, 1991, 265(3), p. 94-104.

Wellner P. "Interacting with Paper on the Digital Desk". *Communication of the ACM*, ACM, 1993, 36(7), p. 86-96.

Wellner P., Mackey W., Gold R. (Eds). "Computer-Augmented Environments: Back to the Real World". *Communication of the ACM*, ACM, 1993, 36(7).

Winograd T. « Architecture for Context », *Human Computer Interaction*, Lawrence Erlbaum Publ., 16(2-4), 2001, p.401-419.