



Université Joseph Fourier

U.F.R Informatique &
Mathématiques Appliquées



Institut National Polytechnique
de Grenoble

ENSIMAG

I . M . A . G .

ECOLE DOCTORALE
MATHÉMATIQUES ET INFORMATIQUE

DEA D'INFORMATIQUE :
SYSTEMES ET COMMUNICATIONS

Projet présenté par :

Christophe Lachenal

Interaction Homme-Machine et Surfaces augmentées

Effectué au laboratoire :

CLIPS-IMAG

Communication Langagière et Interaction Personne Système

Equipe IIHM

Ingénierie de l'Interaction Homme Machine

Date : le 20 juin 2000

Jury : Christine Collet

Joëlle Coutaz

James .L Crowley

Laurence Pasqualetti

Remerciements

Je tiens à remercier toutes les personnes qui ont permis que cette année de DEA se passe de la meilleure façon qui soit. Plus précisément tous mes remerciements à Joëlle qui a su m'encadrer et me mettre dans des bonnes conditions de travail, à Daniela qui a toujours trouvé le temps de répondre à mes questions concernant la vision et à François qui malgré la distance a continué à collaborer avec moi.

Je remercie aussi toutes les personnes qui de près ou de loin m'ont suivi pendant ce travail, notamment toute l'équipe IHM, dans laquelle l'ambiance a toujours été au beau fixe, la PicaTeam qui a contribué à une ambiance sympathique malgré tout le stress qui s'accumulait et à ma famille qui a supporté mon manque de présence.

Merci aussi à Maryline, Julie, Greg, Yannick, Lionel et tous les joueurs de batoto pour leur soutien.

Table des matières

Remerciements	3
Table des matières.....	4
Table des figures.....	6
Introduction.....	9
1 Le contexte.....	9
2 Les objectifs et la démarche	10
3 La structure du mémoire	11
Chapitre 1 Surfaces d'information : état de l'art.....	13
1 Introduction	13
2 Le tableau conventionnel : usage et lacune	15
2.1 Usages du tableau conventionnel	15
2.2 Les lacunes du tableau conventionnel	18
3 Les surfaces à électronique intégrée ou tableaux électroniques ..	19
3.1 Les tableaux à projection arrière	20
3.2 Les tableaux tactiles	21
3.3 Les tableaux à scanner.....	24
4 Les surfaces à électronique externalisée ou tableaux augmentés	25
4.1 Tableaux augmentés par amplification d'instruments	26
4.2 Instruments "analogiques" : les phicons.....	28
4.3 Amplification par la vision par ordinateur.....	29
5 Les surfaces pour un usage collectif	33
5.1 Videowhiteboard et Clearboard	33
5.2 Collaborages.....	34
6 Synthèse critique.....	35
6.1 Le tableau conventionnel : synthèse	35
6.2 L'état de l'art : synthèse	36
Chapitre 2 Surfaces d'information : un espace de conception	39
1 Introduction	39
2 Les concepts : présentation générale.....	39
3 Contenu informationnel.....	40
4 Le concept de surface.....	41
4.1 Définitions	41
4.2 Attributs et propriétés d'une surface élémentaire.....	44
4.3 Attributs et propriétés d'une surface composée	45
5 Les instruments.....	46
5.1 Définition	46
5.2 Attributs et propriétés.....	46

6	Les capteurs.....	47
6.1	Définition	47
6.2	Attributs	47
6.3	Propriétés.....	48
7	Conclusion	49
Chapitre 3 Contribution théorique et technique au suivi de doigt par vision par ordinateur: application au Tableau Magique		51
1	Motivations	51
2	Requis techniques pour le suivi de doigt	52
2.1	IFC : modélisation.....	52
2.2	Latence	54
2.3	Précision	55
2.4	Stabilité statique.....	55
2.5	Résolution spatiale.....	56
2.6	Robustesse	56
2.7	Requis lié aux caractéristiques de l'objet suivi	57
3	Implémentation actuelle	59
3.1	Principe du suivi.....	60
3.2	Initialisation du suivi.....	62
4	Proposition	63
4.1	Approche.....	64
4.2	Suivi par contour actif (snake)	64
4.3	Suivi par "Rigid Contour Model" (RCM).....	66
4.4	Adapter la zone de recherche.....	70
4.5	Récapitulatif	72
4.6	Problèmes interactionnels	72
5	Conclusion	74
Conclusion.....		77
1	Synthèse de la contribution	77
2	Perspectives.....	78
Bibliographie.....		79
Annexe 1		84

Table des figures

Figure 1 : Surface d'information, capteurs et effecteurs.....	14
Figure 2 : Utilisation du tableau en contexte professionnel.....	15
Figure 3 : Les types d'inscription sur un tableau au bureau (d'après [Brinck 92]).	17
Figure 4 : le LiveBoard en cours d'utilisation au cours d'une session de réflexion de groupe.	20
Figure 5 : En mode interprétation de geste, la courbe (en pointillée sur l'image de gauche) exprime une demande de création d'une séparation verticale du texte situé en-dessus et en-dessous. La partie droite de l'image montre le résultat de l'interprétation.	21
Figure 6 : Le SmartBoard , un tableau tactile. Au bas de la surface, les emplacements dédiés aux instruments.....	22
Figure 7 : Le SmartBoard est un logiciel d'aide à la réflexion de groupe. A droite, un bandeau de sauvegardes du tableau mises au format timbre-poste. Ces sauvegardes peuvent être rappelées à tout moment comme document de travail.	23
Figure 8 : Le Panaboard. Au bas de la surface, l'imprimante intégrée.....	25
Figure 9 : Le dispositif du Mimio.	26
Figure 10 : Le dispositif du eBeam.....	27
Figure 11 : Principe d'une interface saisissable (extrait de [Fitzmaurice 95]). Un objet physique (ici une brique) est associé à une entité virtuelle en le posant sur la..	28
Figure 12 : Des phicons du Metadesk (extrait de [Ullmer 97])	29
Figure 13 : Correspondance par analyse de pixels. Cet exemple illustre le principe de recomposition d'image par extraction de points d'intérêt. La partie droite de l'image (B) et la partie gauche (A) se superposent.	31
Figure 14 : Exemples de commandes du BrightBoard.....	31
Figure 15 : Montage technique du Bureau Digital.....	32
Figure 16 : Segmentation de la main. A gauche une image de la main acquise par la caméra et à droite cette même image analysée par le système : les doigts ont été détectés.	33
Figure 17 : Le clearboard en action.	34
Figure 18 : Collaborage et ses fiches magnétiques.	35
Figure 19 : La situation d'interaction avec des surfaces d'information.	40
Figure 20 : Espace de propriétés permettant de qualifier un point d'une surface d'information.	42
Figure 21 : Relations ensemblistes entre surface brute et surface nette.	43
Figure 22 : Boucle de l'interaction fortement couplée (d'après [Ware 94])	53
Figure 23 : Boucle de l'interaction fortement couplée (d'après [Ware 94]).....	53
Figure 24 : Temps de cycle des différents processeurs du modèle du processeur humain ([Card 83]).....	54
Figure 25 : La taille de plus petite cible est inférieure à la résolution spatiale : elle ne peut être sélectionnée.	56
Figure 26 : Acquisition d'une cible de largeur L à une distance D du pointeur.....	57

Figure 27 : vitesse du doigt selon la direction du pointage. (de 1 à 4 verticale, de 5 à 8 horizontale et de 9 à 16 diagonale).....	58
Figure 28 : l'appareillage du tableau magique (dessin de Grégory Barborini).....	59
Figure 29 : Suivi par corrélation, le motif (dans le cadre noir) est comparé à une sous partie de l'image en tout lieu par un parcours systématique.	60
Figure 30 : Formule de la "Normalised Cross Correlation".....	60
Figure 31 : Rapport des tailles de cible, motif, et zone de recherche.....	61
Figure 32 : Variation d'apparence de l'index en fonction de l'orientation du bras.....	62
Figure 33 : Energie de la zone sensible lors d'une activation du suivi.	63
Figure 34 : Initialisation (A) et stabilisation (B) d'un snake autour d'un doigt.	65
Figure 35 : A l'initialisation le snake peut servir à la localisation du motif à suivre pour la corrélation.	65
Figure 36 : enveloppe du doigt ; en bleu les points calculés comme faisant partie de l'enveloppe et en rouge le point central (servant à l'initialisation du suivi).	66
Figure 37 : Processus de rotation de l'enveloppe du doigt afin de trouver l'orientation pour laquelle la somme des gradients en chaque point est maximale (le pseudo code qui suit explique cela).....	67
Figure 38 : Processus d'initialisation : à gauche (A) initialisation automatique et à droite (B) initialisation interactive d'après [Hall 99].....	69
Figure 39 : Lancer de rayon dans 12 directions par rapport à un point central (point rouge), le système calcule les points composants l'enveloppe (points bleus) à l'intérieur de la zone sensible.....	69
Figure 40 : La zone de recherche est calculée par rapport à la direction du mouvement et à un angle alpha contrôlé par le système.....	70
Figure 41 : Recomposition de la zone de recherche suivant une forme plus efficace. A gauche une zone de recherche conventionnelle et à droite une zone de recherche adaptée ayant la même surface.....	71
Figure 42 : Comparaison entre une zone de recherche carré et une zone de recherche triangulaire. La distance D	71
Figure 43 : Fonctionnement du menu rythmique. Les items sont sélectionnés tour à tour par le système.	74

Introduction

1 Le contexte

Cette étude s'inscrit dans un mouvement récent de l'Interaction Homme-Machine (IHM) : la Réalité Augmentée (RA). Le paradigme de la RA s'appuie sur l'association étroite de deux principes :

1. la conservation des objets physiques qui nous sont familiers, et
2. l'amplification électronique de ces objets.

Ce faisant, la RA vise une synergie performante entre l'électronique et les pratiques non informatisées du quotidien. Son objectif est d'estomper la barrière entre les objets informatiques (par exemple, un document présenté à l'écran) et les objets et activités du monde réel (tel le livre ouvert sur la table de travail). Contrairement à la Réalité Virtuelle, qui vise l'illusion par le truchement de l'électronique, la RA est avant tout ancrée dans le "physicalisme".

Les objets physiques qui motivent cette étude sont des surfaces planes utilisables comme support d'information. Le tableau mural nous sert d'archétype. Présent au bureau, dans les salles d'enseignement comme au domicile, le tableau s'inscrit dans nos activités quotidiennes professionnelles ou privées. Destiné à l'écriture, il sert aussi de support à des objets porteurs de message : post-it, cartes postales, objets aimantés. En bois, à l'origine, ou en ardoise, le tableau mural fait maintenant appel à des matériaux très variés. Sans apprentissage préalable, le tableau est accessible à tous. Disponible à tout instant, il permet une utilisation opportuniste instantanée (sous réserve cependant que les feutres et la brosse d'effacement soient en bon état!). Sa surface pouvant couvrir tout un mur, il offre un espace de travail confortable. Dès lors, plusieurs personnes peuvent évoluer à proximité du tableau, agir simultanément sur les inscriptions, explorer mentalement une information ou la retrouver.

Ces avantages doivent cependant être tempérés par quelques insuffisances fonctionnelles [Mynatt 99a]: en cours de réunion, la réorganisation spatiale des inscriptions nécessite une reproduction manuelle, ou bien, une inscription utile peut être effacée par inadvertance ; en fin de réunion, l'absence de dispositif d'archivage et de diffusion entraîne une recopie manuelle du contenu au risque de trahir ou d'omettre des détails sémantiques importants ; après la réunion, la genèse du contenu est perdue : on ne peut rejouer le processus de co-construction.

Les tableaux électroniques de l'offre commerciale [Mimio, SmartBoard, SoftBoard] visent à combler les lacunes du tableau conventionnel. Mais si l'on y regarde de plus près, ces tableaux, bien que semblables en apparence aux tableaux conventionnels, sont, dans l'esprit, homologues aux "tableaux blancs" des stations de travail. De facto, l'utilisateur ne retrouve pas toujours les qualités intrinsèques du tableau mural physique. Ce constat motive les objectifs de ce DEA.

2 Les objectifs et la démarche

L'objectif général de cette étude est la conception et la mise en œuvre de surfaces d'information selon les principes de la Réalité Augmentée :

1. les surfaces conventionnelles physiques, tel le tableau mural, constituent le point d'ancrage de la conception et de la mise en œuvre,
2. le dosage de l'amplification électronique doit combler les lacunes du réel tout en conservant les avantages du naturel.

Analysons de plus près cet objectif.

L'amplification électronique, on le sait, revêt de multiples formes. En l'absence de solution unique à notre problème, il convient d'identifier les possibilités et de les situer dans un espace. Cet espace doit permettre aux concepteurs que nous sommes de formuler les bonnes questions, d'instruire nos choix, de comparer des solutions existantes, d'ouvrir de nouvelles pistes : il constitue un outil analytique prédictif. Les choix de conception une fois motivés, nous sommes en mesure de mettre en œuvre une solution d'Interface Homme-Machine. Faisant suite à une recherche doctorale effectuée dans mon équipe d'accueil [Bérard 99], je m'intéresserai à la solution du Tableau Magique. Il s'agit d'un tableau conventionnel où le doigt, suivi par un système de vision par ordinateur, peut servir de dispositif de pointage. Ce choix impose au système de suivi des requis de performance qu'il faut assurer et vérifier de manière expérimentale.

Pour résumer, j'adopte en amont une démarche analytique avec l'utilisation d'un espace de conception qui permet de prédire les qualités d'une solution et en aval, une campagne de tests expérimentaux de validation de cette solution.

Notre objectif général et la démarche retenue impliquent les trois sous-objectifs suivants :

Définition d'un espace de conception permettant de raisonner sur les diverses façons d'amplifier des surfaces d'information. Cet espace doit permettre de comprendre la nature de ces surfaces, de comparer les solutions actuelles, d'identifier des voies inexploitées. En particulier, j'étudierai l'exemple du Tableau Magique où l'amplification est assurée au moyen de la vision par ordinateur.

Etude d'une nouvelle technique de suivi de doigt par vision par ordinateur. S'il est vrai que le suivi de doigt proposé par F. Bérard pour le Tableau Magique répond au requis de latence de 50ms, il manque de robustesse. Ce défaut se traduit par la perte du doigt au cours de son déplacement. Il convient donc de se pencher sur ce problème.

Vérification expérimentale de la solution. La campagne de tests doit comporter deux volets : l'un technique, l'autre ergonomique. Sur le plan technique, Il s'agit de mesurer les performances intrinsèques d'une autre technique de suivi de doigt. Sur le plan ergonomique, il convient de vérifier auprès d'utilisateurs représentatifs les qualités interactionnelles annoncées par l'analyse prédictive de l'espace de conception.

Au-delà de ces trois objectifs de recherche, ce travail de DEA inclut le portage sur Windows de la bibliothèque de vision, TclVision [Bérard 99], actuellement disponible sur MacOS et Irix.

3 La structure du mémoire

Les résultats de mes travaux de recherche sont présentés comme suit.

On trouvera au chapitre 1 une présentation de l'état de l'art en matière de surfaces d'information. L'analyse de l'existant permet de justifier les dimensions de l'espace de conception visé.

Le chapitre 2 présente ma première contribution conceptuelle au domaine de l'Interaction Homme-Machine : la description de l'espace analytique pour la conception et la mise en œuvre de surfaces d'information. Des exemples tirés de l'état de l'art du chapitre 1 étayent la discussion.

Au chapitre 3, je développe mon étude sur le suivi de doigt par vision par ordinateur en vue de servir les requis interactionnels du Tableau Magique.

La conclusion rappelle les principaux points de mes contributions et énonce des éléments de perspectives en vue de recherches doctorales.

Chapitre 1

Surfaces d'information : état de l'art

1 Introduction

En géométrie, une *surface* est une "figure à deux dimensions de l'espace qui peut être considérée soit comme engendrée par le déplacement d'une courbe, soit comme l'ensemble de points satisfaisant à une loi déterminée" [Petit Robert]. En physique, la surface est une zone de discontinuité entre un solide et un autre milieu.

Une *surface d'information* emprunte aux deux définitions : c'est bien un ensemble fini de points satisfaisant à une loi (par exemple, l'appartenance à un même plan) et elle forme bien une frontière entre deux milieux, l'un solide (le support de la surface), l'autre gazeux (l'air qui nous entoure). En outre, ces points, parce qu'ils sont observables et manipulables par un système humain et/ou informatique, constituent pour ces agents, de l'information potentielle. Pour un système informatique, l'observation des points se fait au moyen de *capteurs*. Chez l'homme, ce rôle d'acquisition est assuré par les sous-systèmes sensoriels (vision, toucher, etc.). La manipulation des points, quant à elle, fait intervenir des *instruments* (un chiffon pour effacer, un stylo pour colorier des points, etc.) actionnés par le système *effecteur* humain (les doigts, la main, le bras, par exemple). Le coloriage de points par un système informatique est réalisé par des *effecteurs* , par exemple un vidéoprojecteur. Le schéma de la Figure 1 montre les relations entre surface d'information, capteurs et effecteurs, que ceux-ci soient artificiels ou naturels.

Figure 1 : Surface d'information, capteurs et effecteurs.

Notre définition de la notion de surface d'information couvre toutes sortes de surfaces. Chez soi, la mappemonde sphérique pivotable sur son axe, est une surface

d'information courante. Toutefois, en raison du temps imparti à cette étude, je me limite au cas des surfaces planes avec une attention particulière pour des surfaces de taille inhabituelle en Interaction Homme-Machine : les tableaux.

Adoptant, comme il se doit en IHM, une conception centrée sur l'utilisateur, nous présentons, dans la section qui suit, les résultats de travaux d'observation sur l'usage des tableaux conventionnels. Cette analyse débouche sur l'identification de lacunes intrinsèques à ces tableaux que l'offre actuelle tente de corriger par l'introduction de technologies électroniques. Nous présentons cet état de l'art selon la nature de l'amélioration : en section 3, les surfaces dédiées à électronique intégrée, puis en section 4, les surfaces telles quelles où l'électronique est externalisée. En 5, nous abordons une dimension orthogonale à la nature de l'amélioration électronique : les solutions conçues pour une utilisation à plusieurs utilisateurs. En conclusion, une synthèse formule une analyse critique de l'état de l'art.

2 Le tableau conventionnel : usage et lacune

2.1 Usages du tableau conventionnel

La Figure 2 résume les usages en contexte professionnel pour les bureaux. On remarquera que la situation d'enseignement n'a pas été étudiée. D'autres utilisations seraient constatées dans le cadre privé du domicile familial. Bien que ces résultats soient partiels, il convient d'en tenir compte dans la conception d'un nouveau dispositif informationnel. Nous les présentons selon les six volets suivants : les finalités, les types de contenu, la gestion de l'espace, le rôle de la couleur et du temps, l'interaction à plusieurs.

Figure 2 : Utilisation du tableau en contexte professionnel.

Les finalités du tableau

Au bureau, le tableau est utilisé à des fins individuelles ou collectives.

À titre individuel, le tableau sert deux objectifs :

1. on y inscrit des notes servant d'aide-mémoire : une liste de choses à faire, un numéro de téléphone à appeler, voire des URL [Mynatt 99a],
2. on y conduit des raisonnements pour mettre ses idées au clair [Mynatt 99a] : les traces écrites, qui servent d'extension à la mémoire à court terme, facilitent le processus de résolution de problème.

En situation collective, le tableau est utile pendant la réunion mais aussi après la réunion. En cours de réunion, il constitue une ressource visuelle partagée qui préserve le contexte de la discussion [Moran 98]. Ce faisant, il facilite la co-construction. Après la réunion, dépositaire de la production collective, il sert de mémoire témoin qui peut être utilisée ensuite par une ou plusieurs personnes, juste après la réunion, ou plus tard de façon opportuniste à la faveur d'une rencontre, ou de manière formelle pour la prochaine réunion planifiée.

Que les inscriptions sur le tableau aient été produites de manière collective ou individuelle, quelle en est la nature ?

La nature des inscriptions

L'enquête effectuée par Brinck auprès de 18 employés de bureau chez Bellcore constitue une bonne piste [Brinck 92]. Dix d'entre eux étaient de formation scientifique (informatique et génie électrique), les huit autres étant des administratifs chargés de gestion financière. A priori, ces deux catégories de sujets, distincts par leurs activités et leur formation, devraient produire des contenus différents. On leur demanda de décrire sur leur propre tableau les dessins, écrits et diagrammes qui se trouvaient déjà sur leur tableau et de reproduire les conversations ayant conduit à ce résultat. Chaque tableau fut photographié après l'interview. La Figure 3 présente les résultats de l'analyse des données ainsi recueillies.

On y voit répertoriées 9 types d'inscription : texte, objet géométrique, équation, diagramme, tableau, liste, croquis, graphique et autres (une carte, par exemple). Pour chaque type d'inscription et pour chaque catégorie de sujet, on lit son occurrence. La figure confirme l'hypothèse de départ : l'occurrence d'un type d'inscription dépend de la catégorie du sujet. Par exemple, un administratif produit peu d'équations mais dessine trois fois plus d'objets géométriques qu'un employé technique.

Au-delà des catégories d'information (texte, dessin, etc.), il faut relever ce que j'appelle les para-inscriptions (des inscriptions "à côté") :

1. les inscriptions à caractère modal qui traduisent l'intention de l'auteur, par exemple, un trait emphatique pour marquer l'importance d'une information,
2. des flèches traduisant des gestes, par exemple le déplacement d'une information d'un lieu vers un autre que l'on aurait aimé pratiquer si le monde physique l'avait permis,
3. des informations permettant de réguler les relations sociales, typiquement, le texte "ne pas effacer s'il vous plaît !".

Destiné à l'écriture, le tableau sert aussi de support à des objets porteurs de message : post-its, cartes postales, objets aimantés. Ces objets accolés sont à finalité décorative et affective (la jolie carte postale d'un collègue), ou à finalité informative (de type aide mémoire), ou encore servent de para-inscription (il existe des affichettes aimantées sur lesquelles il est inscrit "effacer" ou "conserver").

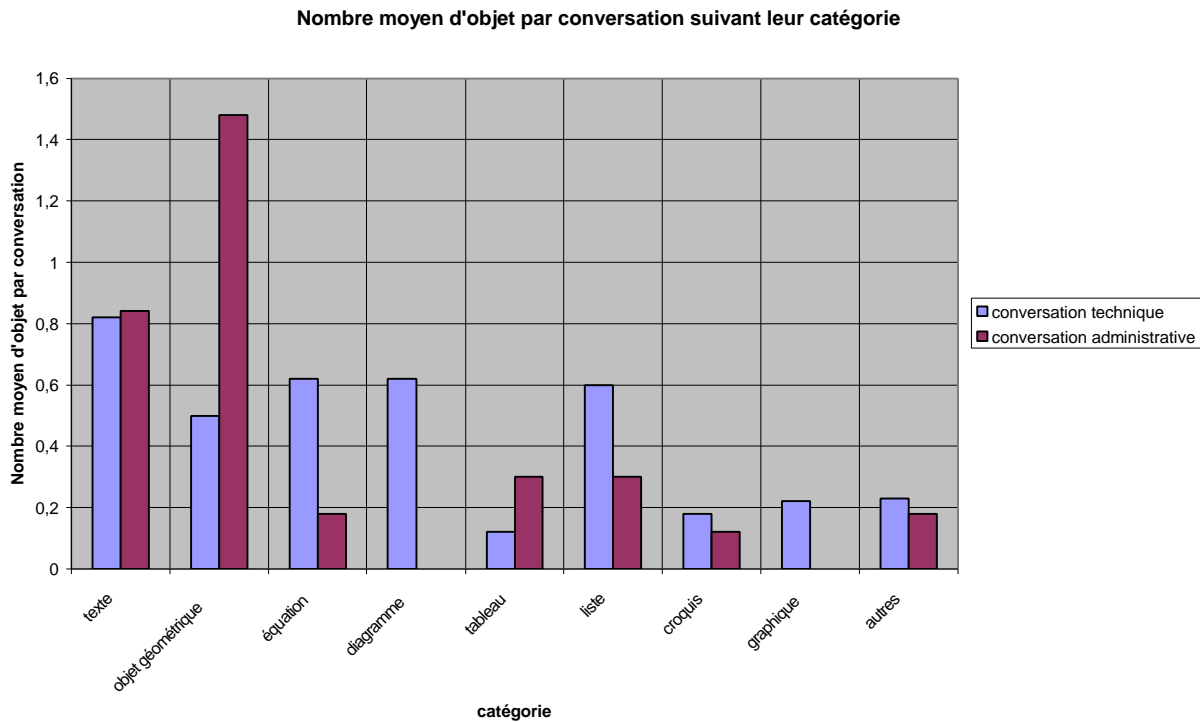


Figure 3 : Les types d'inscription sur un tableau au bureau (d'après [Brinck 92]).

Le rôle de la couleur

Brinck [Brinck 92] et Mynatt [Mynatt 99a] font un même constat : le choix d'une couleur de marqueur est aléatoire. Les utilisateurs n'ont pas de stratégie prédéfinie sur le choix d'une couleur, surtout en début de « session » d'utilisation d'un tableau vide d'inscriptions. Certains disent utiliser une couleur parce qu'elle est plus facile à effacer que d'autres mais la nature de la couleur varie d'un utilisateur à l'autre (sans doute, si je me réfère à ma propre expérience, en raison des propriétés, non pas de la couleur, mais de la substance chimique de l'encre en relation avec les propriétés physiques de la surface).

Des stratégies se forment cependant à la volée avec la complexité croissante du matériau de réflexion. Typiquement, sur un tableau encombré dont on souhaite conserver le contenu, une autre couleur est choisie pour assurer la lisibilité de la nouvelle inscription ou pour marquer la singularité de statut d'une information (par ex., un numéro de téléphone). Mais la nature même de la couleur ne véhicule pas de sémantique. C'est le contraste entre deux couleurs qui importe afin de trancher.

Ainsi, en situation collective, parce que les utilisateurs changent de manière opportuniste de marqueur, un système ne pourrait identifier l'auteur d'une inscription à partir de sa couleur. Or, ce service d'identification serait utile à la reconstitution de la genèse du contenu informationnel du tableau.

Le rôle du temps

Le temps joue un double rôle selon que l'on considère la finalité des inscriptions ou la fréquence d'utilisation du tableau :

Une note servant d'aide-mémoire (par exemple, un numéro de téléphone) se veut semi-permanente, voire permanente. Il s'agit de ne pas l'effacer par inadvertance. D'autres inscriptions ont un caractère éphémère. Au bilan, les inscriptions à finalité distincte ont des statuts différents au regard du temps.

L'utilisation des tableaux se fait par à-coups, de courtes périodes d'utilisation intensive s'inscrivant dans de longues périodes de léthargie [Mynatt 99a].

La gestion de l'espace

La gestion de l'espace couvre deux dimensions : le regroupement et l'effacement d'information. Plusieurs travaux convergent sur les leçons suivantes [Mynatt 99a, Moran 95, Saund 94, Shipman 95] :

Le contenu des tableaux est structuré en groupements. Mynatt en compte 5 en moyenne et observe que les groupements peuvent se recouvrir mais sont rarement inclus les uns dans les autres.

Trouver de l'espace libre sur un tableau encombré est une tâche fréquente. On constate deux types de stratégie utilisateur : les "utilisateurs au bureau propre" effacent entièrement leur tableau chaque jour tandis que les "utilisateurs parcimonieux" adoptent à leur tour deux attitudes possibles : certains réservent des zones dédiées à la réflexion opportuniste effaçables sans retenue (les aide-mémoire étant rangés en des lieux réservés) ; chez d'autres, les zones sont banalisées, l'effacement d'information migrant de zones en zones en fonction de la situation.

L'interaction à plusieurs

Je distinguerai l'utilisation synchrone (où plusieurs utilisateurs se servent en même temps du dispositif), et l'utilisation asynchrone (où le contenu n'est pas exploité simultanément à plusieurs).

En situation synchrone dans un bureau, l'utilisation collective du tableau se fait généralement à deux personnes au plus [Brinck 92] mais cet accès peut être simultané [Bly 88]. Je propose d'étendre ce constat au cas de l'enseignement en présentiel. En TD, par exemple, un étudiant et l'enseignant sont amenés à agir simultanément sur la surface tandis que les autres étudiants observent.

En situation asynchrone, le partage de l'information produite collectivement est une question pertinente : le contenu du tableau ne pouvant migrer, on en recopie le contenu pour l'emmener avec soi [Mynatt 99a]. Tâche fastidieuse s'il en est avec le risque d'oubli ou de transcription erronée.

2.2 Les lacunes du tableau conventionnel

Les insuffisances du tableau blanc conventionnel sont de nature fonctionnelle : manque de support à la réorganisation spatiale des inscriptions, absence de service d'archivage et de récupération des résultats de la discussion. Nous reprenons ces trois points.

Absence d'outil de réorganisation

L'écriture sur tableau blanc, facile et rapide, est adaptée à la concrétisation d'idées. Cependant, les idées sont produites sans ordre. La phase de génération est souvent suivie d'une phase de réorganisation. L'organisation des idées est reflétée par les relations spatiales des inscriptions qui les concrétisent. En pratique, la réorganisation nécessite la recopie (assortie éventuellement d'un changement d'échelle) des inscriptions sur une partie vierge du tableau, puis l'effacement des inscriptions originales.

Il s'agit d'un processus lourd, sujet à erreur ou à oubli (suite aux recopies et à la perte du contact visuel avec l'inscription originale), peu adapté au changement fréquent entre phases de génération et phases de réorganisation. Ou bien, parce que la tâche est jugée trop coûteuse, on surchargera les inscriptions de flèches et de boîtes englobantes traduisant la réorganisation souhaitée.

Absence de dispositif de sauvegarde

La conservation du contenu du tableau permet à chaque participant de disposer d'un exemplaire et, aux absents intéressés, de prendre connaissance des résultats tangibles de la discussion. Ce contenu peut aussi servir de point de départ à une réunion ultérieure ou servir à la communication synchrone à distance.

En l'absence de dispositif de sauvegarde, l'absence de dispositif d'archivage et de diffusion entraîne une recopie manuelle du contenu au risque de trahir ou d'omettre des détails sémantiques importants. Après la réunion, la genèse du contenu est perdue. On ne peut pas rejouer fidèlement le processus de co-construction : qui a écrit quoi, à quel moment et pour quelle raison ?

Absence de dispositif de récupération

Quand bien même, le contenu du tableau aurait été saisi sur une feuille de papier ou transcrit manuellement sur un support informatique sous forme d'un compte rendu électronique (mail, fichier), il n'est pas possible d'en récupérer le contenu pour une prochaine session, ni retrouver facilement ce contenu.

Nous abordons maintenant les offres d'amélioration au regard de cette analyse des usages : les solutions d'amélioration par électronique intégrée, puis les améliorations par électronique externalisée.

3 Les surfaces à électronique intégrée ou tableaux électroniques

J'appelle *surface à électronique intégrée* ou *tableau électronique*, tout dispositif matériel dédié qui intègre derrière la surface d'écriture des capteurs capables de renseigner le système sur son contenu. Ces surfaces respectent l'apparence du tableau blanc conventionnel par la taille et la forme, mais leurs qualités fonctionnelles, tactiles et visuelles diffèrent du tableau usuel.

On distingue trois sortes de tableaux électroniques : les tableaux à projection arrière, les tableaux tactiles et les tableaux fondés sur la technologie scanner. Après l'exposé de ces trois catégories, on trouvera à la section 6, une synthèse critique.

3.1 Les tableaux à projection arrière

Les tableaux à projection arrière sont en général intégrés dans un meuble à l'intérieur duquel un vidéo projecteur relié à un ordinateur projette, par un jeu de miroirs, l'encre électronique sur une surface semi-transparente. Une lentille permet de régler la taille des inscriptions projetées. Le meuble, qui est mobile, peut être placé à l'endroit désiré de la pièce (donc pas nécessairement contre le mur) ou être déplacé dans une autre pièce.

La surface, qui est semi-transparente, est donc dédiée, fabriquée à façon. Les instruments le sont aussi : les stylos ne disposent pas d'encre physique et seule leur forme permet de les identifier comme stylo. Leur position dans l'espace et leur état (mode écriture ou mode commande) sont repérés par un ou plusieurs capteurs.

En somme, les tableaux à projection arrière n'utilisent que des informations de nature électronique. Le Liveboard [Elrod 92] et Tivoli [Pedersen 93] relèvent de cette catégorie.

LiveBoard

Le LiveBoard développé à Xerox PARC est le précurseur en ce domaine. Développé en 1987, il a subi quelques légères modifications matérielles pour se stabiliser dans les années 1992. La Figure 4 en montre un exemplaire en action.

Figure 4 : le LiveBoard en cours d'utilisation au cours d'une session de réflexion de groupe.

Le Liveboard permet d'annoter les documents ouverts sur le bureau virtuel. Son stylo a été conçu à cette fin : équipé de trois boutons comme la souris d'un PC, il en a les mêmes fonctions pour gérer les fenêtres et manipuler les documents. De plus, au niveau de sa mine se trouve un capteur qui renseigne le système sur le mode courant (écriture ou non). Le stylo contient un émetteur infrarouge qui émet en permanence. Au centre, derrière la surface, se trouve le module de détection du stylo. Ce module et les boutons permettent d'utiliser le stylo même s'il n'est pas en contact avec la surface, comme un pointeur laser pour désigner à distance.

Tivoli, développé également à Xerox PARC, utilise le Liveboard comme infrastructure matérielle.

Tivoli

Tivoli permet de structurer des inscriptions construites librement. Autrement dit, l'utilisateur peut écrire n'importe où, sans contrainte, puis structurer ses écrits au moyen de gestes dédiés imprimés sur le stylo. La Figure 5 donne quelques exemples de gestes.

Le stylo, qui peut servir à l'écriture proprement dite ou à l'écriture de commandes, a deux modes. Dans le mode interprétation de l'écriture comme geste de commande, l'utilisateur peut : regrouper des inscriptions dans un même ensemble, découper des inscriptions en plusieurs parties, sélectionner une inscription et l'effacer ou l'insérer ailleurs. Il s'agit de techniques d'interaction intuitives même si certaines sont de haut niveau, par exemple signifier d'un trait qu'il faut déplacer deux inscriptions en deux colonnes distinctes. La richesse du vocabulaire gestuel, même s'il a été étudié avec attention, se paie par un temps d'apprentissage non négligeable pour en maîtriser l'utilisation.

La conception de Tivoli, on le voit, est motivée par les lacunes du tableau conventionnel en matière de réorganisation spatiale du contenu. Puisqu'on évolue dans un milieu purement électronique, on retrouve les fonctions d'édition usuelles des stations de travail telles que "défaire", "refaire" et "grouper". Si le groupement est utile, il présente des lacunes : le groupe n'est pas visuellement apparent, les éléments du groupe ne sont pas manipulables et aucune interprétation sur la structure du groupe ne peut être faite.

Par souci de simplicité, Tivoli n'admet pas de superposition de transparents.

Figure 5 : En mode interprétation de geste, la courbe (en pointillée sur l'image de gauche) exprime une demande de création d'une séparation verticale du texte situé en-dessus et en-dessous. La partie droite de l'image montre le résultat de l'interprétation.

3.2 Les tableaux tactiles

Les tableaux tactiles sont, comme leur nom l'indique, équipés de surfaces dotées de capteurs de pression. L'effecteur est un vidéo projecteur qui projette par devant de l'information électronique sur la surface. Les stylos peuvent être de deux sortes : à encre physique ou, comme dans le LiveBoard, des stylets sans encre. Le tableau est relié au système informatique par un câble serti. Au bas de la surface, des plateaux servent à ranger les stylos et la brosse (voir la Figure 6).

**Figure 6 : Le SmartBoard , un tableau tactile.
Au bas de la surface, les emplacements dédiés aux
instruments.**

Les tableaux tactiles permettent de combiner des inscriptions à encre physique ou à encre électronique. Ils constituent l'offre commerciale la plus répandue en matière de tableaux électroniques. Parmi les neuf propositions que j'ai dénombrées en ce jour (voir Annexe 1), j'ai retenu les exemples les plus représentatif : le SmartBoard et Flatland, une réalisation logicielle sur l'infrastructure matérielle du SmartBoard.

Le SmartBoard

Le SmartBoard, qui existe depuis 3 ans, est une offre attrayante si l'on s'en tient au slogan de vente. Il s'agit "d'un tableau interactif qui améliore votre manière de collaborer, de présenter et d'enseigner. Il combine l'apparence et la sensation d'un tableau usuel avec la puissance d'un système, ainsi vous pouvez sauvegarder et imprimer vos notes mais aussi collaborer sur des documents électroniques." Voyons comment ces arguments publicitaires sont réalisés techniquement et s'ils tiennent leurs promesses.

Les composants techniques du SmartBoard (c'est-à-dire, le vidéoprojecteur, l'ordinateur et la surface de travail) ne sont pas, contrairement au LiveBoard, regroupés de manière solidaire dans un meuble. Cette indépendance impose une tâche préalable de calibrage qui établit la correspondance entre l'espace de projection et l'espace d'acquisition, ces deux espaces étant, au niveau physique, confondus avec la surface de travail. Cette tâche, qui prend quelques minutes, doit être effectuée dès que la surface de travail ou que le vidéoprojecteur est déplacé.

Le calibrage une fois réalisé, le SmartBoard est opérationnel. La Figure 7 montre un exemple d'interface utilisateur pour un logiciel d'aide à la réflexion de groupe. Tout logiciel peut être utilisé avec le SmartBoard. Il suffit que la sortie vidéo du ordinateur soit branchée sur le vidéoprojecteur et que le câble du SmartBoard soit branché sur une sortie RS232 du ordinateur. Les stylos remplacent la souris : sélection, déplacement, écriture libre, etc. Le SmartBoard offre ainsi un changement d'échelle par rapport à la station de travail usuelle. Sur le plan fonctionnel, il remplit son contrat

en répondant aux lacunes du tableau conventionnel. Analysons maintenant la dimension interactionnelle.

Figure 7 : Le SmartBoard est un logiciel d'aide à la réflexion de groupe. A droite, un bandeau de sauvegardes du tableau mises au format timbre-poste. Ces sauvegardes peuvent être rappelées à tout moment comme document de travail.

Le SmartBoard inclut des instruments dédiés (effaceur et stylets) mais il autorise aussi l'emploi des stylos feutres usuels, le doigt, la brosse ordinaire. Les capteurs de la surface détectent les points sollicités que ce soit avec un feutre, une brosse ou un doigt. La réaction du système dépend du mode actif :

- En mode écriture, toute pression entraîne une écriture à encre électronique dont la couleur est la couleur courante, par exemple bleu. Ainsi, écrire avec un feutre rouge trace des inscriptions à encre physique rouge sur lesquelles s'affiche un double électronique d'encre bleu. De même, effacer une inscription à encre physique avec la brosse usuelle effectue bien l'effacement, mais imprime de nouvelles inscriptions électroniques.
- En mode commande, toute pression en-dehors des icônes projetées se traduit par une sélection : de l'encre physique est déposée et le système produit un rectangle élastique!
- Au bilan, quel que soit le mode, le mixage d'instruments dédiés et usuels est source d'erreurs.

Si l'on s'en tient aux stylets dédiés, l'utilisateur n'est pas pour autant à l'abri de difficultés. Chaque stylet a une robe de couleur bien visible (bleu, rouge, vert, noir). Au bas du tableau, on observe un emplacement par stylet de surface colorée (bleu, rouge, vert, noir) et équipée d'un capteur de pression. Retirer un stylet d'un emplacement assigne à la couleur courante d'écriture, la couleur de cet emplacement. Ainsi, comme pour le LiveBoard, la couleur de production électronique peut différer de la couleur de l'instrument que l'on tient dans la main : le stylet de couleur X a pu être rangé dans un emplacement de couleur Y, mais aussi si plusieurs stylets sont absents, la couleur courante est celle du premier emplacement libéré, et enfin, la couleur courante peut être changée par sélection d'une icône dédiée à cet effet.

La surface présente aussi des inconvénients sur le plan interactionnel. Ces remarques sont tirées de notre expérience personnelle :

A un instant donné, la surface n'accepte qu'un seul point de pression. De facto, le dispositif technique exclut l'utilisation simultanée par plusieurs utilisateurs. Si on l'imprime deux points distincts simultanément, le système utilise un point médian comme point d'impact!

Le contact tactile diffère du tableau conventionnel. On sent un vide sous la pression. La surface paraît fragile et les inscriptions physiques ne s'effacent pas toujours convenablement.

La résolution spatiale est inférieure à celle d'un tableau conventionnel, l'utilisateur ne peut jouer sur l'épaisseur du trait.

Malgré ses limitations intrinsèques liées à la technique matérielle, le SmartBoard a servi d'infrastructure au développement de plusieurs systèmes dans des laboratoires de recherche : l'IdeaBoard [IdeaBoard, Nakagawa 97] et Flatland.

Flatland

La conception de Flatland fait suite à une analyse centrée sur l'usage [Mynatt 99b]. La motivation est ici de produire un dispositif qui pallie les lacunes fonctionnelles du tableau conventionnel tout en conservant sa simplicité naturelle. Il s'agit de ne pas reproduire sur un mur le "desktop" de la station de travail.

Dans Flatland, les instruments sont dédiés. En l'absence de stylo feutre, l'utilisateur ne manipule que de l'information électronique. Mais l'information est organisée en segments typés. Un segment est une région connexe de la surface de travail dont le contour est visible, et capable d'interpréter un contenu d'un type donné : segment de type graphe, de type carte, de type calculette, etc. Sa surface s'agrandit au fur et à mesure de son remplissage. Il est assorti d'un menu jaillissant circulaire (forme qui minimise les déplacements du stylet et d'une estampille. Les segments peuvent être unifiés, découpés, déplacés. Grâce à l'estampille, la genèse du contenu du tableau peut être rejoué (utile pour les absents ou les retardataires à une réunion).

Le segment traduit la notion de zone dédiée que les utilisateurs se créent avec les tableaux conventionnels. La notion de type permet de faire migrer vers le système des tâches utilisateur. Par exemple, dans le segment de type carte, le tracé d'un trait simple se traduit par le dessin d'une route en double trait. Dans le segment calculette, les chiffres écrits à main levée au stylet sont reconnus, les opérations effectuées et le résultat affiché dans un style manuscrit. Dans un segment de type "liste de choses à faire", des cases à valider sont ajoutées à gauche des inscriptions. Du point de vue technique, la notion de segment permet d'ouvrir Flatland à toute une gamme d'outils qui se révéleraient utiles dans le futur (sous réserve que cette ouverture conserve la propriété de simplicité).

3.3 Les tableaux à scanner

Les tableaux à technologie scanner sont les descendants directs des photocopieurs haut de gamme. Comme certains panneaux publicitaires routiers, ils incluent une surface semi-rigide à glissement latéral. Sur l'un des cotés, un scanner numérise le contenu pendant que la surface se déplace. Une imprimante est intégrée sous le

tableau assurant une restitution sur papier physique. Les instruments sont les feutres et la brosse conventionnels.

Le Panaboard [Panaboard] de Panasonic est un exemple de tableau électronique à technologie scanner (voir Figure 8). Il offre une solution idéale pour l'archivage d'inscriptions que ce soit sur papier grâce à l'imprimante, ou sous forme de document électronique si le tableau est relié à un ordinateur. La présence d'un ordinateur est optionnelle si l'imprimante suffit à l'information de tous les participants.

Le Panaboard peut offrir 2 ou 4 panneaux d'écriture : soit la "toile" tourne simplement autour du tableau et dans ce cas deux panneaux sont utilisables tour à tour, soit la "toile" glisse le long d'un U et quatre panneaux sont possibles. De plus, en collant sur la surface du panneau une feuille physique, son contenu peut être capté et intégré au contenu du panneau.

Figure 8 : Le Panaboard. Au bas de la surface, l'imprimante intégrée.

Un panneau de boutons de commande permet de contrôler le tableau. Les actions possibles sont les suivantes : passer au panneau suivant, effacer le panneau courant, imprimer le contenu courant du tableau, imprimer sur une même feuille la juxtaposition de plusieurs panneaux et cela en N copies ($N \leq 9$).

Nous venons de présenter des exemples de surfaces à électronique intégrée. Voyons le cas des surfaces à électronique externalisée.

4 Les surfaces à électronique externalisée ou tableaux augmentés

J'appelle *surface à électronique externalisée* ou *tableau augmenté*, un tableau conventionnel original auquel sont adjoints des capteurs et des effecteurs. Autrement dit, la surface "vient tel quel" : capteurs et effecteurs n'y sont pas intégrés. L'exposé qui suit distingue l'amplification de surfaces par les instruments (sections 4.1 et 4.2) de l'amplification par la caméra ou vision par ordinateur (section 4.3). En section 6, nous présentons une synthèse critique des tableaux augmentés.

4.1 Tableaux augmentés par amplification d'instruments

Cette approche consiste à accoler des capteurs aux instruments. Dans cette catégorie, on relève deux offres commerciales très semblables : le Mimio [Mimio] et plus récemment le eBeam [Ebeam], et une solution originale : l'Anoto [Anoto].

Le Mimio

Avec le Mimio, les stylos feutre du commerce doivent être introduits dans un étui de plastique coloré (une couleur par couleur de stylo). Sur l'étui, près de la mine du stylo, un capteur de pression indique si l'utilisateur écrit ou si le stylo est en position levée. L'étui émet des ultrasons que capte un récepteur, sorte de barre en plastique qui se fixe par des ventouses sur le tableau. Ce récepteur est relié à un PC par une ligne série RS232. L'ensemble capteurs-récepteur assorti de communications à infrarouge et à ultrason, permet au système de localiser à la volée le stylo sur la surface de travail et d'en identifier la couleur. Le Mimio n'a pas d'effecteur, donc pas de projection d'encre virtuelle.

Figure 9 : Le dispositif du Mimio.

Le Mimio propose une suite logicielle qui assure les services suivants : capture et impression du contenu de la surface de travail, partage entre plusieurs utilisateurs distants, correction des annotations sauvegardées et transfert des inscriptions vers d'autres applications. Il convient de retenir qu'en l'absence de vidéoprojection, la visualisation de contenu électronique et son édition ne peuvent se faire sur le tableau. Cette tâche doit être conduite sur l'écran d'une station de travail. S'il y a partage avec des utilisateurs distants, le lieu de production privilégié est celui du tableau conventionnel augmenté.

Selon des tests informels menés par des utilisateurs que nous connaissons, la sensibilité des capteurs est inadaptée, et cela sur deux points qui nuisent à l'interactivité :

- Le capteur de pression requiert de la part de l'utilisateur un temps de pause pour que le système détecte le mode écriture. En l'absence de pause, la production initiale est visible puisqu'elle est produite au feutre physique mais elle n'est pas captée.

- La résolution spatio-temporelle des capteurs de localisation diminue avec l'augmentation de la distance au récepteur. D'où la nécessité parfois de repasser sur son écriture.

Enfin, nous avons relevé une troisième cause de faute de capture : la panne de source d'énergie avec l'usure des piles installées dans les étuis des stylos.

Sans vidéo projection, le système ne peut fournir de retour d'information immédiat sur les informations captées. Dès lors, l'utilisateur n'est pas informé en temps réel des faiblesses de la capture sauf s'il vérifie le résultat sur la version électronique présentée sur un écran à part. On voit ici émerger des tâches articulatoires qui font disruption dans le processus de production. En pratique, il faut écrire doucement de grandes lettres pour que la capture soit satisfaisante.

Le EBeam

Comme le montre la Figure 10, le eBeam est analogue au Mimio. Le récepteur, en deux composants d'une dizaine de cm chacun, est moins encombrant que la barre du Mimio. On retrouve les étuis pour les feutres ainsi que la brosse dédiée.

Nous ne disposons pas de mesures expérimentales de cet appareillage mais, fondé sur la même technologie que celle du Mimio, il est raisonnable de prévoir un comportement interactionnel similaire.

Figure 10 : Le dispositif du eBeam.

L'Anoto

L'Anoto est un exemple original d'amplification de surface par les instruments [Anoto]. Ici, la surface de travail est une feuille de papier dont la surface est pré-imprimée de motifs de points à peine visibles. Si la surface est modifiée du point de vue système, elle est presque "telle quelle" du point de vue de l'utilisateur.

L'instrument est un stylo de bureau à encre. A l'intérieur, une caméra infrarouge et un capteur de pression sur la mine sont reliés à un émetteur répondant au protocole

Bluetooth [Bluetooth]. La caméra détecte la position de la mine sur le papier grâce aux petits motifs que forment les points. Chaque motif est une matrice de points légèrement non alignés. C'est ce non alignement qui permet à la caméra d'identifier en temps réel le motif et donc de localiser le stylo sur la feuille. Le motif est suffisamment riche pour permettre au stylo de se repérer sur une feuille « virtuelle » de 2100 km² (soit la moitié de la surface des USA). Comme le stylo sait où il se trouve, on peut imaginer que si sur le papier se trouve une case à cocher, alors un ordinateur avec la technologie Bluetooth peut être informé du fait que l'utilisateur avec le stylo numéro X vient de commander une paire de chaussure de taille 42.

Avec l'Anoto, le concept de surface va au-delà du tableau mural : il s'agit d'un outil de capture mais aussi d'un moyen de communication.

Nous venons de voir l'amplification des instruments usuels d'écriture. Dans la section qui suit, nous étudions les systèmes où les instruments d'amplification sont "analogiques".

4.2 Instruments "analogiques" : les phicons

Nous dirons qu'un *instrument est analogique* lorsqu'il fonctionne par analogie de forme avec les concepts qu'il permet de manipuler. On l'appelle également "phicon" (pour "Physical ICON" ou "icône physique") [Ishii 97]. Le MetaDesk nous sert d'exemple illustratif ([Ullmer 97], [Ishii 97]), mais il en est d'autres qui relèvent tous du principe des interfaces saisissables.

Interface saisissable

La notion d'*interface saisissable*, que l'on doit à Fitzmaurice ([Fitzmaurice 95], [Fitzmaurice 96]), dénote une famille d'interfaces homme-machine dans lesquelles des objets physiques saisissables servent d'instrument. La position et l'orientation de ces objets sont à tout instant connues du système. L'utilisateur interagit avec le système en associant un ou plusieurs de ces objets à des entités virtuelles : objets graphiques (fenêtre graphique, icône de fichier) ou fonctions (opération sur l'espace de travail tels que déplacement, effet de zoom, rotation). Comme le montre la Figure 11, l'association entre un objet physique et une entité virtuelle se crée en posant l'objet sur la représentation de l'entité. Une fois l'association établie, l'état de l'entité est modifié en déplaçant l'objet. Elle est rompue dès que l'objet est soulevé.

Figure 11 : Principe d'une interface saisissable (extrait de [Fitzmaurice 95]). Un objet physique (ici une brique) est associé à une entité virtuelle en le posant sur la représentation de l'entité. L'association est rompue dès que l'objet est soulevé.

En général, la surface de restitution des systèmes à interface saisissable est horizontale afin d'y déposer les composants physiques. On peut toutefois imaginer une interface saisissable sur une surface verticale, par exemple un tableau, avec des objets munis d'aimants.

Le MetaDesk

La première application du MetaDESK est un système de navigation sur une carte. Comme le montre la Figure 12, l'instrument est ici une réplique miniature du bâtiment principal (le Dôme) du Massachusetts Institute of Technology (M.I.T.). Poser le dôme miniature sur le MetaDESK fait apparaître la carte du campus du M.I.T centrée sur la position du Dôme miniature. La carte peut ensuite être déplacée et pivotée par translation et rotation respectives 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. En éloignant les deux miniatures sur la surface, l'utilisateur effectue un effet de zoom sur la carte (et inversement).

Figure 12 : Des phicons du Metadesk (extrait de [Ullmer 97])

Dans le cas du MetaDesk, la surface est un verre translucide avec projection arrière. Dans d'autres montages comme Built-It ([Rauterberg 98] [Fjeld 98]), appliqué à la conception d'usines, le plan en deux dimensions est projeté sur la surface d'une table. Une brique permet de manipuler les concepts du domaine (par exemple, une machine de l'usine).

Techniquement, les phicons sont réalisées au moyen de capteurs magnétiques de type Flock of Birds, mais comme le montre F. Bérard dans sa thèse, la vision par ordinateur est pertinente.

4.3 Amplification par la vision par ordinateur

Avec l'amplification par vision par ordinateur, des caméras vidéo jouent le rôle de capteur. Externes à la surface observée, elles offrent des solutions "à surface et instruments tels quels". Les solutions fondées sur cette approche se répartissent en trois catégories de couverture fonctionnelle croissante :

- La caméra sert uniquement de scanner : le contenu de la surface observée est numérisé. Notre exemple type est le Videobrush Whiteboard [VideoBrush].
- La caméra numérise le contenu de la surface observée et le système est capable d'interpréter des commandes écrites au tableau (c.-à-d. des para-inscriptions). C'est le cas du BrightBoard et du ZombieBoard.
- La caméra numérise le contenu et le système détecte et suit des instruments (doigt, stylo, phicons, etc.). L'exemple pionnier en la matière est le Bureau Digital de Xerox. Inspiré de ses principes interactionnels, nous relevons l'Enhanced Desk [Sato 00] et le Tableau Magique.

Dans tous les cas, le contenu numérisé peut être édité, imprimé, distribué par voie électronique. Cette approche est donc parfaite pour un archivage à la demande et pour la diffusion du contenu à tous les membres d'une réunion.

La caméra comme scanner

Videobrush Whiteboard est une offre commerciale utilisable sur toutes les machines de type PC équipées de caméras de type WebCam reconnues par l'API "Vidéo for windows". Il s'agit d'une solution de bas de gamme délivrant une image de contenu du tableau de qualité médiocre. Les commandes de contrôle sont affichées sur l'écran du système, non pas sur la surface de production, engendrant de fait des discontinuités visuelles et donc des tâches articulatoires de déplacement.

Le Brightboard [Stafford-Fraser 96] et le ZombieBoard [Saund 96] capturent le contenu du tableau au niveau de résolution voulue par assemblage d'images prises en plans resserrés sur le tableau (correspondant à un facteur de zoom de la caméra contrôlée par ordinateur). Cette technique dite de mosaïcing offre une grande souplesse sur le choix de la résolution. La difficulté technique tient à l'assemblage des images élémentaires. Il s'agit de faire correspondre parfaitement les frontières de ces images sous peine de voir apparaître des "cassures". La Figure 13 en exprime succinctement le principe. On trouvera dans [Bérard 99, Chap. V], une présentation détaillée de la réalisation. La résolution des images acquises avec le ZombieBoard est meilleure que celle que l'on peut avoir avec le Brightboard du fait de l'utilisation dans plus gros facteur de zoom de la caméra ; cependant ce gain de qualité implique un temps d'acquisition plus grand.

Figure 13 : Correspondance par analyse de pixels. Cet exemple illustre le principe de recomposition d'image par extraction de points d'intérêt. La partie droite de l'image (B) et la partie gauche (A) se superposent.

Au-delà d'une capture de qualité, le BrightBoard et le ZombieBoard sont capables de reconnaître des para-inscriptions.

Para-inscriptions : Le BrightBoard et le ZombieBoard

La Figure 14 illustre les capacités d'interprétation du BrightBoard. Il s'agit d'inscriptions simples entourées d'un rectangle ou mises entre crochet. Le ZombieBoard adopte cette même technique fondée sur des indices visuelles.

Figure 14 : Exemples de commandes du BrightBoard.

En accord avec la notion de zone dédiée que les utilisateurs se créent sur les tableaux conventionnels, le ZombieBoard utilisent des symboles servant de délimiteurs de zone. Ainsi une zone délimitée associée avec le bouton « scanner » signifie au système que seule cette zone doit être archivée.

Le suivi d'instruments : l'Enhanced Desk et le Tableau Magique

L'Enhanced Desk [Sato 00] et le Tableau Magique [Bérard 99] sont les héritiers directs du Bureau Digital, pionnier en matière de Réalité Augmentée [Wellner 91, Newman 92]. Pour ces trois systèmes, la main sert d'instrument privilégié.

La Figure 15 montre le montage technique du Bureau Digital, principe repris tel quel pour le Tableau Magique. Le Bureau Digital possède tous les attributs du bureau physique : on peut y entreposer ses livres, stylos, gommages, et tasse à café. Le Bureau Digital est équipé d'une caméra et d'un projecteur vidéo disposés au-dessus du plan de travail. La caméra est reliée à un système de vision par ordinateur destiné à interpréter les gestes de l'utilisateur, tandis que le projecteur restitue sur le plan de travail l'information numérique en provenance du système.

Figure 15 : Montage technique du Bureau Digital.

L'idée est de conserver ce qui fonctionne bien dans le monde physique mais de l'amplifier par des services électroniques dont l'équivalent dans le monde physique est difficile, voire impossible, à réaliser. Dans le cas du Bureau Digital, l'utilisateur

conserve ses feuilles de papier, crayons et gomme et la duplication de texte, opération complexe dans le monde physique, devient une opération triviale sous forme électronique. Par exemple, l'utilisateur sélectionne le paragraphe d'un livre posé sur le bureau. Il se sert de ses deux index pour désigner les extrémités opposées d'un rectangle de sélection. Le système projette un retour d'information immédiat sur le livre : le rectangle de sélection s'affiche sur le livre en suivant les déplacements des doigts. Une fois le texte sélectionné, le lecteur peut dupliquer et déplacer le paragraphe en faisant glisser le rectangle de sélection au moyen du doigt.

Le prototype du Bureau Digital, imaginé par Wellner et présenté sous forme d'une vidéo n'est en fait qu'une simulation destinée à démontrer le paradigme d'interaction. Au moment de sa conception, Wellner ne dispose pas des connaissances et techniques nécessaires à la réalisation d'un prototype entièrement fonctionnel. Seul un suivi élémentaire par d'images a été mis en œuvre pour expérimenter la désignation au doigt.

Le Tableau Magique sur lequel nous reviendrons en détail au chapitre 3, est la solution que nous développons dans l'équipe IHM. Motivé par les principes de la Réalité Augmentée, il part du tableau conventionnel et vise à introduire juste ce qu'il faut de services électroniques. Le capteur est une caméra contrôlable pan/tilt/zoom servant un double objectif : capture au niveau de résolution voulue du contenu du tableau, et suivi de doigt comme instrument de pointage. Un vidéoprojecteur sert d'effecteur pour l'affichage des retours d'informations du système. Au bilan, le tableau comporte des inscriptions à encre électronique et physique (les feutres et l'effaceur usuels sont utilisables) mais le système ne présente pas les doublons électroniques-physiques du SmartBoard.

L'Enhanced Desk [Sato 00] reprend la manipulation au doigt et à deux mains du Bureau Digital. Ici, on utilise une caméra infrarouge qui facilite la segmentation pour localiser la main dans l'image (voir Figure 16). Cette technique ne permettant pas la capture des inscriptions, nous ne la retiendrons pas plus avant.

Figure 16 : Segmentation de la main. A gauche une image de la main acquise par la caméra et à droite cette même image analysée par le système : les doigts ont été détectés.

5 Les surfaces pour un usage collectif

Les tableaux à usage collectif utilisent la surface de travail comme lieu de production commune. La collaboration peut avoir lieu entre des utilisateurs colocalisés ou des utilisateurs distants. Nous présentons ci-dessous trois exemples pour un usage partagé distant : le VideoWhiteBoard [Tang 91], ClearBoard [Ishii 92] et Collaborage [Moran 99].

5.1 Videowhiteboard et Clearboard

Le Videowhiteboard, qui date de la fin des années 80, sert de précurseur au ClearBoard. L'un et l'autre utilisent une technologie analogique et tous deux visent à recréer un espace de colocalisation.

Videowhiteboard transfère par voie vidéo le contenu de tableau : la caméra d'un site est reliée par canal vidéo sur le vidéo projecteur de l'autre site. Bien que la qualité de l'image soit médiocre, une communication orale et gestuelle est possible permettant notamment le pointage et la demande d'explication.

Figure 17 : Le clearboard en action.

Clearboard reprend les mêmes principes techniques que le VideoWhiteBoard, mais vise en plus à recréer le contact visuel. Aussi, comme le montre la Figure 17, le tableau du VideoWhiteBoard est-il remplacé par une table à surface translucide. La métaphore est celle d'une vitre où les personnes pourraient écrire de chaque côté. La scène perceptible à travers la vitre est le contenu de la surface de production commune fusionnée avec l'image du collaborateur distant.

5.2 Collaborages

Techniquement, Collaborages est le ZombieBoard sur lequel on peut placer des étiquettes magnétiques. Une étiquette comporte des informations sur une personne (sa photo) et un code visuel permettant au système de l'identifier. Le tableau est divisé en lignes et colonnes (voir Figure 18). Le but du système est de faciliter la coordination des membres d'une équipe répartie sur plusieurs sites.

Le système est installé dans le bureau du chef de projet chargé de l'attribution des tâches à ses collaborateurs. L'attribution d'une tâche à une personne donnée se traduit par le placement de son étiquette magnétique au bon emplacement. Le système, qui analyse le contenu du tableau toutes les minutes, identifie la personne à laquelle la tâche est attribuée. Il retranscrit les informations du tableau en une page web consultable à tout instant par tous les membres du projet.

Figure 18 : Collaborages et ses fiches magnétiques.

6 Synthèse critique

Je propose une analyse critique de l'offre actuelle au regard des qualités et lacunes du tableau conventionnel.

6.1 Le tableau conventionnel : synthèse

Le tableau conventionnel a comme qualité d'être disponible immédiatement, d'être facile d'emploi et d'offrir une surface de travail confortable :

- Disponible en permanence et sans délai de mise en route, le tableau n'interfère pas avec la tâche de réflexion. Il répond aux situations opportunistes de besoin

immédiat et fortuit sous réserve, évidemment, que les instruments (stylos feutres et effaceur) soient opérationnels.

- Facile d'emploi, le tableau est accessible à tous, quel que soit le profil de compétences. Les feutres et l'encre ont des propriétés dont les participants peuvent tirer parti : contrôle fin de la forme et de l'épaisseur du trait, échange prompt entre feutres de différentes couleurs tenus dans une main, et corrections rapides en effaçant l'encre au doigt. La rapidité des opérations est un atout essentiel du tableau : alors qu'ils agissent, les participants peuvent suivre le rythme du discours. La complémentarité entre les modalités vocales et écrites peut alors avoir lieu sans discontinuité.
- Les tableaux blancs offrent une surface de travail dont la taille est supérieure à celle des supports de dessin usuels : feuilles de dessin, ou grandes feuilles de papier attachées en bloc sur un présentoir. La grande taille des tableaux favorise le dialogue à plusieurs. Pedersen et ses collaborateurs l'appellent "tableau pour la conversation" [Pedersen 93]. Leurs résultats tirés d'expériences sur le travail collaboratif médiatisé par des surfaces de dessin partagées, démontrent que, du point de vue de la collaboration, les actions physiques des participants à proximité de la surface sont aussi importantes que les inscriptions. Ce résultat milite pour une surface de travail assez grande afin que plusieurs personnes puissent évoluer en sa proximité.

En contrepartie, les tableaux conventionnels souffrent de défauts fonctionnels : absence de mécanismes pour la réorganisation spatiale de l'information, pour le changement d'échelle, l'archivage, la récupération de contenu, et l'historique pour retrouver la genèse. L'utilisation observée des tableaux suggère des améliorations utiles, mais moins prioritaires que celles que nous venons de citer :

- notion de zones dédiées comme celles que l'on réserve pour les aide-mémoire. En corollaire vient l'étude des relations entre ces zones dédiées du tableau et les assistants personnels ou les post-its physiques, voire les capacités de migration de l'information entre ces divers supports,
- zones à contenu typé, par exemple zone de texte ou de graphes qu'un système informatique saurait interpréter et "mettre au propre" à la demande ; URL ou numéro de téléphone cliquables en sorte que le tableau servirait de "portail d'accès" à d'autres services,
- interpréteur de para-inscriptions ou de contenu d'objets accolés : fiche aimantée "conserver" ou "envoyer à Dupont", feuille de papier dont on aimerait réutiliser le contenu pour initier une discussion à plusieurs.

Mais on retiendra que la couleur n'est pas significative si ce n'est son utilisation pragmatique pour traduire un contraste entre plusieurs inscriptions.

6.2 L'état de l'art : synthèse

Nous proposons une analyse comparative en sept points : lacunes fonctionnelles, disponibilité immédiate, gestion de la couleur et des modes, résolution spatiale, physicalité et usage collectif.

Lacunes fonctionnelles. Les tableaux électroniques à projection arrière (LiveBoard et son logiciel compagnon, Tivoli,) comme les tableaux tactiles (le SmartBoard et le logiciel Flatland) offrent une solution fonctionnelle complète aux lacunes du tableau conventionnel. A contrario, les tableaux électroniques à technologie scanner (Panaboard) ou les tableaux augmentés de base par caméra tel le Videobrush WhiteBoard, n'ont pas de support électronique d'édition (celle-ci peut cependant se faire hors-ligne sur une station de travail à partir de la copie électronique). Ils assurent des fonctions d'archivage et de diffusion, mais elles restent élémentaires.

Disponibilité immédiate. De tous les tableaux électroniques, seule la technologie scanner et les tableaux augmentés par caméra assurent la propriété de disponibilité immédiate : le contenu produit avant la mise en marche peut être capté a posteriori. Pour les autres, le système doit être lancé, voire calibré, pour s'en servir.

Instruments. Alors que les tableaux à scanner et les tableaux augmentés n'utilisent que des instruments conventionnels, les tableaux à projection arrière n'ont que des instruments dédiés tandis que les tableaux tactiles autorisent les deux possibilités. Ce mixage d'instruments, attrayant en première analyse, peut être cause de gêne et d'erreurs :

- Dans le cas du SmartBoard, un doublon électronique est projeté au-dessus de l'inscription physique. Par conception technique, le doublon est inévitable.
- Si le doigt peut servir d'instrument, il ne peut servir qu'à écrire alors qu'avec les tableaux conventionnels, le doigt sert à désigner ou à effacer. Par inadvertance, l'utilisateur d'un tableau tactile écrira de l'encre électronique là il souhaitait effacer de l'encre physique.

Enfin, un instrument augmenté par un étui à capteurs peut tomber en panne en raison de l'usure des piles.

Gestion de la couleur. Dès l'instant où le logiciel gère un mode "couleur", on observe un risque de mauvaise correspondance entre la couleur "système" et la couleur de l'instrument tenu dans la main. Cette différence peut être source d'erreurs. Par exemple, le stylo du LiveBoard est physiquement noir. Par défaut, la couleur qui lui est assignée est le noir. Le changement de couleur se fait comme dans les logiciels de dessin au moyen d'une commande. Si la couleur courante est observable sur l'écran, elle ne l'est pas sur le stylo que l'on tient dans la main. Pour le SmartBoard, nous l'avons vu, la situation est encore plus complexe.

Gestion de mode. En IHM, on le sait, les modes sont inévitables et sont source d'erreur : on oublie de vérifier la nature du mode actif et donc d'exprimer au système notre désir de changer de mode. Le stylo du LiveBoard, qui joue un double rôle, en tant qu'instrument d'écriture de contenu et d'écriture de commandes, possède plusieurs modes. Les articles dont on dispose sur le LiveBoard n'indiquent pas si le mode est "maintenu" par l'utilisateur ou par le système : un mode maintenu par l'utilisateur conduit à moins d'erreurs qu'un mode maintenu par le système [Sellen 92]. Ici, le mode serait maintenu par l'utilisateur si par exemple, le stylo était en mode commande tant que l'utilisateur maintient un certain bouton enfoncé. Il serait maintenu par le système si le passage entre modes se faisait par un clic de bouton. On constate les mêmes défauts de mode avec le SmartBoard.

Résolution spatiale. Aucun des tableaux électroniques et tactiles n'atteint la qualité visuelle du tableau conventionnel. La résolution des tableaux à scanner, fondée sur celle du scanner et de l'imprimante employés, est de bonne qualité. De même les tableaux augmentés par caméra contrôlable tels le ZombieBoard ou le Tableau Magique, offrent des garanties de très haute résolution.

Physicalité. Les tableaux électroniques et tactiles sont similaires dans leur solution aux outils d'édition des stations de travail. Inversement, les tableaux augmentés par caméra visent l'harmonieux rapprochement de l'électronique vers les outils qui nous sont familiers : la surface de travail reste le tableau conventionnel, des phicons ou le doigt peuvent servir d'instruments d'action directe sur l'information, et un effecteur vidéo permet de produire les retours d'information appropriés. Cette voie mérite d'être explorée plus avant.

Collaboration. L'étude des qualités interactionnelles nécessaires au soutien du travail à distance fait l'objet de nombreuses recherches. A ce jour, la couverture fonctionnelle des surfaces à usage partagé reste élémentaire.

Chapitre 2

Surfaces d'information : un espace de conception

1 Introduction

Le chapitre 1 sur l'état de l'art en matière de surfaces d'information met en évidence des concepts récurrents : surface, instrument, capteur et effecteur. Partant du tableau conventionnel, nous avons étudié les solutions techniques visant à l'améliorer selon deux catégories : les tableaux électroniques et les tableaux augmentés. Les uns et les autres se distinguent par le rapport que leur surface de travail entretient avec les capteurs et les effecteurs. Pour les tableaux électroniques, les capteurs sont intégrés à la surface alors qu'ils sont externes dans le cas des tableaux augmentés. Dans ce dernier cas, la surface est un objet familier "qui vient tel quel".

Si ces éléments sont suffisants pour organiser un état de l'art, ils ne permettent pas de comprendre ou de raisonner sur la nature des surfaces d'information, ni d'en extraire des propriétés utiles à la conception de nouveaux dispositifs en conformité avec les besoins et les caractéristiques humaines. Il convient donc de fouiller la nature des concepts de base introduits au chapitre précédent. C'est l'objet de ce chapitre.

En 2, nous présentons les concepts intervenant dans la situation d'interaction d' un ou plusieurs utilisateurs avec une surface d'information informatisée. Dans les sections qui suivent, nous identifions, pour chacun de ces concepts, les attributs et les propriétés. Des exemples tirés de l'état de l'art du chapitre 1 serviront d'illustration.

2 Les concepts : présentation générale

La Figure 19, reprise de la Figure 1 du chapitre précédent, rappelle les relations entre surface, instrument, capteur, effecteur et contenu. Observons l'existence symétrique de capteurs, d'effecteurs et de contenu informationnel du côté humain comme du côté système. Entités naturelles du côté humain, ces concepts sont artificiels du côté système. Entités naturelles et artificielles communiquent via des entités interactionnelles que sont la surface avec son contenu informationnel et les instruments.

Figure 19 : La situation d'interaction avec des surfaces d'information.

3 Contenu informationnel

La notion de contenu informationnel a plusieurs facettes selon qu'il est associé à la surface, au système ou à l'utilisateur.

- Le contenu attaché à la surface est une représentation instantanée de la production d'information collective. (Dans le contexte de cette discussion, la collectivité comprend le système et un ou plusieurs utilisateurs locaux ou distants.) Ce contenu joue le rôle de mémoire de travail partagée entre l'utilisateur et le système : extension de la mémoire à court terme pour l'utilisateur, représentation d'un extrait pertinent de l'état interne pour le système.
- Le contenu attaché au système dénote l'historique de la production d'informations avec le système. Extension de la mémoire à long terme de l'utilisateur, cet historique peut couvrir la production de plusieurs sessions ou la production de la session en cours. Sa plus simple expression est le double du contenu actuel attaché à la surface.
- Le contenu attaché à l'utilisateur dénote la représentation mentale que l'utilisateur a de sa production avec le système : productions des sessions passées, productions de la session en cours, production actuelle.

Cette analyse montre le rôle de support à la mémoire humaine que peuvent jouer les contenus informationnels de la surface et du système. Ce besoin utilisateur a d'ailleurs été identifié dans l'analyse du tableau conventionnel en termes de services de sauvegarde, d'historique, de recherche et d'extraction d'information. Alors que le contenu attaché à la surface concerne un instant t , les contenus système et utilisateur couvrent un ensemble d'instantanés. La conception d'une surface d'information impose de s'interroger sur la compatibilité des instantanés entretenus par le système et ceux qui sont pertinents pour les tâches utilisateur.

4 Le concept de surface

4.1 Définitions

Reprenons la définition présentée au chapitre 1 : "Une surface d'information est un ensemble fini de points satisfaisant à une loi et formant une frontière entre deux milieux, l'un solide (le support de la surface), l'autre gazeux (l'air qui nous entoure). En outre, parce qu'ils peuvent faire l'objet de traitements par un système humain et/ou informatique, ces points constituent de l'information potentielle".

- Une surface d'information, telle que je la définis, comprend donc deux volets complémentaires :
- Un volet abstraction en tant qu'ensemble fini de points dont le traitement constitue de l'information,
- Un volet physique en tant que frontière finie entre deux milieux, solide et gazeux.

Alors que le volet abstraction permet d'embrasser l'infini de la richesse informationnelle d'une surface, le volet physique permet d'appréhender, par sa frontière matérielle, le caractère unitaire ou composé d'une surface :

- Une surface d'information est élémentaire lorsque sa frontière matérielle constitue une unité. Un tableau mural, une feuille de papier, un mur, une toile à dessin, sont des surfaces élémentaires.
- Une surface d'information est composée lorsqu'elle est le résultat d'un assemblage de surfaces, que celles-ci soient élémentaires ou composées. Plusieurs tableaux disposés côte à côte dans une pièce forment une surface composée. En référence au PanaBoard [Panaboard], un tableau sur lequel on aurait fixé une feuille de papier est une surface composée.

Une surface d'information, élémentaire ou composée, n'est pas nécessairement exploitée dans sa totalité, ni par le système, ni par l'utilisateur. Par exemple, un utilisateur de petite taille ne pourra accéder en écriture au sommet d'un tableau fixé trop haut pour lui. De même, le Tableau Magique ne projette de l'encre électronique que sur un sous-ensemble de la surface du tableau. En pratique, il convient de distinguer la surface brute de la surface nette :

- La surface brute dénote l'ensemble des points de la surface physique potentiellement utilisable,
- La surface nette correspond à l'ensemble des points effectivement utilisés. On distinguera S_{ns} , la surface nette système, de S_{nu} , la surface nette utilisateur.

La surface nette système sert plusieurs fins :

- projection d'information via les effecteurs,
- capture d'information au moyen de capteurs.

Ainsi, un point de la surface brute est caractérisé par un ensemble de trois propriétés illustrées dans la Figure 20 :

- Il est ou non un point à encre physique (un point sans encre physique est un point effacé),
- Il est ou non un point projeté (on dit aussi qu'il est à encre électronique, résultat de la projection de "pixels" éteints ou allumés),

- Il est ou non un point acquis par le système. S'il est acquis, il est ou non interprété par le système, et s'il est interprété, il joue le rôle de para-inscription ou d'inscriptions de contenu, et ce contenu peut être typé au sens de Flatland (graphe, texte, calculatrice, etc.).

Autrement dit, Sns, la surface nette du système est l'union de l'ensemble Pas des points pour lesquels la propriété "acquis par le système" est vraie et de l'ensemble Pps des points pour lesquels la propriété "projeté par le système" est vraie :

$$Sns = Pas \cup Pps$$

Figure 20 : Espace de propriétés permettant de qualifier un point d'une surface d'information.

La Figure 21 montre les relations possibles entre la surface brute Sb et la surface nette Sns :

- Egalité entre Sb et Sns : le recouvrement est total. La solution technique est dirigée par le monde physique (cas A).
- Sb est incluse dans Sns : Le système utilise toute la surface brute mais aussi son environnement (cas B).
- Sns est incluse dans Sb : une partie de la surface physique peut être exploitée par l'utilisateur sans que le système le sache. Il convient que l'utilisateur soit conscient que les actions qu'il entreprend dans cette partie, par exemple écrire, sont ignorées du système (cas C).
- Intersection non vide entre Sns et Sb : Une partie de Sb est inutilisée par le système alors que le système exploite une partie de l'environnement. L'utilisateur doit être averti de cette configuration (cas D).
- Intersection vide entre Sns et Sb : Sns n'est pas utilisée par le système, mais exploite uniquement l'environnement (le système constitue un environnement dit perceptif, hors du champ de notre étude) (cas E).

Figure 21 : Relations ensemblistes entre surface brute et surface nette.

La surface nette système étant l'union de deux ensembles, on peut, si besoin est, affiner le raisonnement et étudier les relations 3 à 3 entre la surface brute S_b , les points acquis P_{as} et les points projetés P_{ps} par le système. Analysons quelques-unes d'entre elles :

- La configuration la plus simple correspond au cas où $S_b = P_{as} = P_{ps}$: la frontière physique de la surface dénote strictement la surface d'évolution possible aussi bien en entrée qu'en sortie.
- $S_b > P_{as}$, alors l'utilisateur risque d'écrire à l'encre physique en un endroit non perçu par le système. En conséquence, la sauvegarde effectuée par le système ne sera pas conforme à l'attente.
- $S_b < P_{ps}$ et $S_b = P_{as}$, alors la zone en-dehors de la surface physique peut servir à présenter de l'information consultables périphérique à la tâche (durée de la réunion, activité d'utilisateurs distants),
- $S_b < P_{ps}$ et $P_{ps} = P_{as}$, alors la zone en-dehors de la surface physique peut servir à présenter de l'information consultables ou cliquables (un bandeau d'icônes de commande par exemple).

Notre analyse fait l'hypothèse implicite que P_{as} et P_{ps} sont constitués chacun d'une seule région. En toute généralité, P_{as} et P_{ps} sont constitués d'un ensemble de régions ou de cliques (au sens ensembliste). Le nombre de cliques et leurs relations peuvent servir de mesure de la complexité d'utilisation et/ou de mise en œuvre d'une telle surface d'information.

Nous avons raisonné sur les éléments de la surface nette système. Un même raisonnement tient pour les éléments de la surface nette utilisateur :

$$S_{nu} = P_{au} \cup P_{pu}$$

où P_{au} est l'ensemble des points acquis par les organes sensoriels de l'utilisateur, et P_{pu} l'ensemble des points produits par les effecteurs utilisateurs ou les instruments actionnés par l'utilisateur.

Il est alors légitime d'étudier les relations :

- entre P_{au} et P_{ps} , les ensembles de points acquis par l'utilisateur et l'ensemble de points projetés par le système,
- entre P_{pu} et P_{as} , les ensembles de points produits par l'utilisateur et l'ensemble de points acquis par le système. Si P_{as} est inclus dans P_{pu} , alors le système n'est pas en mesure d'acquérir toute la production de l'utilisateur ;

- entre Ppu et Pps. Par exemple, dans le cas du SmartBoard, les inscriptions produites au feutre conventionnel se voient doublées d'une version électronique (mais pas nécessairement de même couleur !). Quelle discernabilité en résulte-t-il pour l'utilisateur?

Au bilan, les ensembles pertinents du système ne sont pas nécessairement identiques aux ensembles pertinents de l'utilisateur. Cette absence d'identité doit susciter des questions de conception.

4.2 Attributs et propriétés d'une surface élémentaire

Attributs

Pour le besoin de cette étude, j'ai relevé les attributs suivants :

- La forme au sens géométrique. Dans cette étude, nous retenons les surfaces planes. Une forme sphérique engendre des questions sur la non observabilité de la face cachée ou de la déformation des informations perçues sur les bords.

- La superficie qui dénote l'étendue de la surface : une feuille de papier n'offre pas les mêmes ressources qu'un tableau. Pour l'utilisateur, interagir en grand diffère de l'interaction en petit. Certains chercheurs en psychologie, tel Y. Guiard, remettent en cause la loi de Fitts établie pour des déplacements de la main sur de petites distances. Le facteur d'échelle importe [Guiard 99].

- La matière constituante : plastique, carton, papier, béton, toile, etc. qui induit des propriétés sensorielles ou sociales (en principe, on n'écrit pas sur un mur en béton !)

Propriétés

Les attributs d'une surface se traduisent par des propriétés pertinentes pour la qualité interactionnelle mais aussi pour la mise en œuvre de système. J'ai retenu :

Discernabilité : liée à la forme ou à la matière qui peut être lisse ou avec des aspérités, matte ou brillante entraînant des reflets (les reflets sont des sources de difficultés aussi bien pour le système visuel humain que pour un capteur caméra).

Mobilité : Mobile, la surface est orientable, pivotable, déplaçable, saisissable (dans la main). Si elle est membre d'une surface brute composée, elle permet d'en changer la configuration.

Observabilité : les frontières des régions d'acquisition et de projection système doivent être observables si elles ne sont pas égales à la surface brute. Ce faisant, l'utilisateur est renseigné sur les capacités de perception et d'action du système.

Inscriptible à l'encre physique ou non (il existe des surfaces antitag!)

Effaçable facilement ou non laissant des traces (comme le crayon sur une feuille de papier ou les feutres sur une surface plastique ancienne). Ces traces sont parfois utiles à l'historique mais sont sources de difficultés pour la capture par caméra (il faut "nettoyer électroniquement" le tableau!).

4.3 Attributs et propriétés d'une surface composée

Attributs

L'attribut de première classe d'une surface composée est la topographie de l'assemblage de surfaces élémentaires. Les relations de composition dans le plan sont : A côté, dessus, dessous, par-dessus, etc. Mais on peut aussi considérer des relations de composition dans l'espace à 3 dimensions.

Par exemple, un mur sur lequel est fixé un tableau constitue une surface brute. La surface brute de la "salle de jeu" de l'équipe IHM comprend 2 murs perpendiculaires, l'un équipé de deux tableaux fixés côte à côte, le second d'un seul tableau. Nous envisageons d'y inclure un palm pilot. Cette surface saisissable entraînera une reconfiguration dynamique de la topographie de la surface brute.

Propriétés

La surface composée hérite des propriétés des surfaces élémentaires.

La question de la couverture d'une propriété sur l'ensemble de la surface composée devient pertinente. Si la couverture est partielle, il y a hétérogénéité. Le concepteur peut tirer parti de cette hétérogénéité pour l'affectation de fonctions à certaines surfaces élémentaires. Par exemple, le Palm Pilot, qui tient dans la main, pourrait servir à maintenir les boutons de contrôle du système (palette de couleurs pour une application de dessin) réservant l'espace de dessin au tableau mural.

5 Les instruments

5.1 Définition

Un instrument est un "objet fabriqué servant à exécuter quelque chose ou à faire une opération" [Petit Robert]. L'instrument est un objet inerte et non productif par lui-même. Dans le contexte de notre étude, les instruments regroupent tous les objets que l'utilisateur serait amené à utiliser pour agir sur la surface (pour en modifier le contenu) ou pour commander le système.

5.2 Attributs et propriétés

Je propose deux types d'instruments :

- Les conventionnels qui tiennent dans la main : stylos à feutre, brosse et chiffon.
- Les accrochables que l'on peut fixer sur la surface: phicons collables ou aimantés,
- La main qui a un statut particulier.

De manière orthogonale, on trouve deux types de fonctions : la fonction d'écriture et la fonction de commande.

Certains instruments sont dédiés à une seule fonction, d'autres couvrent les deux, auquel cas le concepteur doit se poser la question du passage d'un mode à l'autre. Cette discussion conduit à la liste d'attributs et de propriétés suivants.

Attributs

Fonction : écriture, commande (liste de commandes)

Production : encre physique ou non.
Porteur de capteur ou non.

Propriétés

Assignation de fonction : immuable ou ré-assignable.

Si la réassignation est possible (que ce soit par le système ou explicitement par l'utilisateur) :

- le mode courant doit être observable,
- la trajectoire d'interaction lorsque la réassignation est effectuée par l'utilisateur doit être minimisée et choisir un mode de type "maintenu" [Sellen 92].

Assignation de commandes : immuable ou ré-assignable dynamiquement. Un chiffon a un rôle immuable. Un instrument augmenté de capteur ouvre à de multiples fonctions de commande programmables. Par exemple, un stylo feutre avec la mine vers le bas est en mode écriture. Retourné, la mine vers le haut, il devient un instrument de sélection et d'effacement d'inscriptions à encre électronique. On note dans notre exemple imaginaire mais inspiré de la métaphore du monde réel, que le changement de mode est commandé et maintenu par l'utilisateur.

Le cas particulier de la main et des doigts

Sur un tableau conventionnel, comme sur toutes les surfaces d'information qui acceptent de l'encre physique, les doigts peuvent servir d'instrument d'effacement. Sur un tableau tactile tel le SmartBoard ou les tableaux augmentés par vision par ordinateur tel le Tableau Magique, le doigt peut s'employer comme instrument d'écriture ou de commande.

Au-delà de sa fonction d'instrument, la main a de bonnes propriétés interactionnelles :

- on sait s'en servir,
- on la porte toujours sur soi (a contrario de l'instrument qui n'est jamais à sa place ou qu'il faut, en situation de production collective, partager à plusieurs),
- elle permet une action directe sur le contenu de la surface alors que l'instrument permet une action indirecte, action médiatisée par l'instrument (action instrumentale).

Le statut particulier de la main justifie en partie notre contribution en vision par ordinateur présentée au chapitre 3.

6 Les capteurs

6.1 Définition

Un capteur est un dispositif capable de détecter un phénomène physique sous la forme de signal dont l'interprétation fournit une information sur ce phénomène. Nous ne traitons ici que les capteurs système.

Dans le contexte de cette étude, les capteurs permettent de renseigner le système sur la localisation des instruments, les inscriptions sur la surface nette, etc.

6.2 Attributs

Les attributs des capteurs sont nombreux. Nous avons dénotés quatre grands types d'attributs : la modalité, l'implantation vis-à-vis des entités interactionnelles, les métriques et la couverture fonctionnelle.

Modalité. Un capteur peut utiliser l'une des modalités suivantes : visuelle, tactile, son, température. La modalité caméra est visuelle. La connaissance de la modalité est pertinente au regard du contexte d'utilisation. Une surface qui détecterait le poser du doigt par des capteurs à infrarouge ne fonctionnerait pas si la surface venait à être exposée au soleil ! Ou bien utiliser un microphone pour détecter le contact du doigt sur une table est acceptable dans un milieu contrôlé. En situation d'usage, on pose aussi sa tasse de café sur la table de travail.

Implantation. Un capteur peut être interne, accolé ou externe à l'entité captée. De manière orthogonale, il est centralisé (en une seule pièce) ou réparti en plusieurs composants :

- Les capteurs de pression du SmartBoard et de l'Anoto sont internes, installés de manière centralisée, respectivement dans la surface et à l'intérieur du stylo,
- Les étuis et la barre du Mimio sont accolés aux stylos feutre et au tableau conventionnels. Ils sont en outre répartis : la partie émetteur est accolée au stylo tandis que la partie récepteur est accolée au tableau. Notons que dans la technologie des ultrasons, émetteur et récepteur sont regroupés.
- La caméra des tableaux augmentés par vision par ordinateur est externe à la fois à tout instrument et surface.
- Un capteur interne est assigné à une entité dédiée (par construction, la réaffectation est impossible), un capteur accolé offre l'amplification du conventionnel au risque d'en modifier la facilité de maniement (plus lourd, plus gros), le capteur externe est le moins intrusif de tous puisqu'il peut capter le comportement du conventionnel sans contact.

Métriques de performance. Les métriques de performance ayant une incidence sur la qualité interactionnelle [Bérard 99] incluent la résolution, la latence, la stabilité, la portée.

La résolution est la plus petite variation perceptible de la grandeur à mesurer dans des conditions de mesure données.

Le temps de latence (ou plus simplement, latence) d'un système est le temps écoulé entre la présentation d'un stimulus à ce système et le début de la réponse correspondante.

La stabilité dénote la capacité de fournir une mesure de phénomène qui ne varie pas lorsque le phénomène ne varie pas.

La portée ou champ d'action : distance et angle à l'intérieur desquels le capteur fonctionne de manière nominale.

Couverture fonctionnelle désigne les services fournis par le capteur. Au regard de notre domaine applicatif, nous retenons la détection, l'identification, le suivi :

- La détection détermine l'occurrence d'une classe d'entité : pour une classe d'entité donnée, la sortie de cette fonction exprime l'existence (ou l'absence) d'une entité relevant de cette classe, par exemple, la présence d'un phicon.
- L'identification vise à désigner parmi les exemplaires d'une classe, le (ou les) exemplaire(s) présent(s) dans la scène. Dans le cas du MetaDesk, ce service permet

de distinguer les différents phicons, porteuses chacune de sens. Un autre exemple est l'identité du stylo d'écriture. Dans une interaction multi-utilisateur à plusieurs mains, le service d'identification devrait être en mesure d'extraire de la scène, les mains qui appartiennent à chaque utilisateur. La présence de deux mains peut correspondre à deux situations de sémantique distinctes. Il peut s'agir des mains d'une même personne, ou bien de mains appartenant à des personnes différentes.

- Le suivi concerne les entités mobiles. Il s'agit de localiser en permanence une entité. L'information de position est plus ou moins complexe si l'entité évolue dans un espace à deux dimensions comme les briques ou le doigt du Tableau Magique. Le suivi s'appuie sur les services de détection et d'identification s'il doit gérer respectivement plusieurs classes d'entités et plusieurs entités d'une même classe.

6.3 Propriétés

Assignation à une entité d'interaction (instrument ou surface). A un instant t , un capteur est assigné à renvoyer des informations sur une entité d'interaction. Cette relation est immuable dans le cas d'un capteur interne. Elle est ré-assignable par l'utilisateur si le capteur est accolé (par exemple, échanger deux étuis de stylos). Elle est ré-assignable dynamiquement par le système lorsque le capteur est externe. C'est le cas de la caméra du Tableau Magique qui capte le contenu du tableau et qui suit le doigt.

Multiplexage. Capacité du capteur à mesurer plusieurs instruments à un instant donné. Par exemple, un caméra peut observer plusieurs entités interactionnelles "simultanément". Les capteurs de pression intégrés dans la surface du SmartBoard ne retournent qu'un seul point à la fois même s'il y a eu plusieurs impacts simultanés.

Disponibilité. La disponibilité d'un capteur exprime sa capacité de bon fonctionnement à tout instant. Or, un capteur fonctionne dans un contexte précis de contraintes. Par exemple, l'invariance de la luminosité est une forte contrainte pour le bon fonctionnement des tableaux augmentés par caméra. Une pile en bon état est une contrainte pour le fonctionnement des capteurs des étuis du Mimio. La disponibilité des capteurs peut être améliorée par la coopération de plusieurs capteurs. Cette composition de capteurs à des fins fonctionnelles données est un sujet de recherche en soi.

7 Conclusion

En synthèse, notre espace de conception permet de caractériser chacun des systèmes présentés au chapitre 1. Concernant le Tableau Magique, qui dispose de capteur et d'effecteur externes, nous pouvons jouer librement sur les points suivants :

- les relations ensemblistes entre la surface brute S_b , les points acquis P_{as} et les points projetés P_{ps} par le système,
- l'assignation dynamique de la caméra aux instruments et son multiplexage,
- la composition dynamique de surfaces aux attributs distincts (mur, tableau conventionnel, Palm Pilot),
- l'utilisation collective en local ou à distance

Par comparaison, le SmartBoard n'offre qu'un jeu de paramètres restreints :

- $S_b = P_{as} = P_{ps}$;

- Attribution immuable des capteurs aux instruments ;
- Absence de multiplexage des capteurs excluant l'utilisation simultanée à plusieurs.

Chapitre 3

Contribution théorique et technique au suivi de doigt par vision par ordinateur: application au Tableau Magique

Le Tableau Magique, développé dans l'équipe IIHM, est un prototype de tableau augmenté (au sens de notre classification de l'état de l'art). Son originalité tient à son l'interaction directe au doigt assurée par un système de suivi par vision par ordinateur. En l'état, ce suivi n'est pas sans défaut. En particulier, son manque de robustesse en limite l'utilisation effective. Ce chapitre rappelle les motivations, les requis techniques et l'implémentation actuelle du système de suivi de doigt. L'analyse qui en est faite permet de proposer une autre approche visant à améliorer l'existant.

1 Motivations

La conception du Tableau Magique part du principe de la conservation des objets conventionnels et de leur amplification à la juste mesure. Reprenant à notre compte les leçons tirées de l'expérience de Mynatt, il convient de résister à la tentation de trop enrichir : "les choix de conception s'orientent vers la conservation des *affordances* des outils existants, même si cette contrainte nécessite de limiter les fonctions ou la complexité de l'outil augmenté" [Mynatt 99].

Il en résulte une approche de type "tableaux augmentés" au sens de notre classification du chapitre 1. De plus, la caméra, capteur externe non intrusif, est retenue comme capteur fondamental. Par ses capacités de multiplexage, elle est en mesure de capter le contenu de la surface, les instruments et notamment le doigt. Les instruments incluent la brosse et les stylos feutre à encre physique pour, précisément, leurs qualités interactionnelles naturelles (définition, précision, etc.). Le doigt, comme instrument, garantit une interaction directe sur la surface. Enfin, ce dispositif ne limite pas le nombre de personnes qui pouvant utiliser les instruments simultanément.

La réalisation des services de "première classe" (sauvegarde, duplication, réorganisation) implique la présence d'une encre électronique. Comme nous l'avons vu pour les systèmes existants, seule l'encre électronique peut être déplacée, réduite ou effacée par le système. Notre solution ne doit pas tendre vers une numérisation à outrance des inscriptions car la physicalité de l'encre a des caractéristiques interactionnelles qui sont à la base du succès des tableaux usuels. Le mélange de ces deux types d'encre doit être possible et leur gestion doit être simple. La manipulation des inscriptions à encre électronique se pratique au doigt.

L'activation des services doit se faire quand ils sont vraiment utiles. Car lors d'une utilisation, il n'est pas certain que les utilisateurs aient à les utiliser. Cependant dans la majorité des cas, comme le montre l'étude de l'usage, leur activation doit être possible à tout instant. Le fait d'avoir un système perfectionné, qui permet d'effectuer des opérations de haut niveau, ne doit pas être source d'entrave pour l'utilisation basique du tableau. Notre solution se doit d'être directement utilisable : les services sont utilisables même si le système n'est pas en marche au moment de la production.

Si le suivi de doigt est une approche raisonnable pour ses qualités interactionnelles, encore faut-il que le système soit capable de le suivre en respect des performances humaines.

2 Requis techniques pour le suivi de doigt

Lorsque le système suit le doigt, c'est pour permettre à l'utilisateur d'agir sur les inscriptions. L'utilisateur doit alors être averti :

- de la position calculée par le système,
- que le système suit le doigt et qu'il est prêt à répondre à une éventuelle commande.

Comme il est extrêmement délicat pour le système (voire impossible) de considérer le bout du doigt comme le point d'impact sur les inscriptions, la position du doigt est un point centré sur l'ongle. Partant de là, un curseur est projeté sur le tableau à proximité de l'enveloppe du doigt. C'est ce curseur électronique que l'utilisateur asservit aux mouvements de son doigt. Cet asservissement, semblable à celui du pointeur de la souris, relève de l'Interaction Fortement Couplée (IFC). Nous en rappelons ci-dessous le modèle et des requis de performances tirés des travaux de Bérard [Bérard 99].

2.1 IFC : modélisation

"Une interaction est fortement couplée sur un intervalle de temps lorsque les systèmes humain et artificiel sont engagés de manière continue dans l'accomplissement d'actions physiques mutuellement perceptibles et dépendantes sur cet intervalle" [Bérard 99]. L'IFC peut être modélisée sous la forme d'un système en boucle fermé ([Card 83], [MacKenzie 93], [Ware 94]). Selon ce modèle, les données en sortie du système sont réintroduites en entrée du système avec un délai T . Ce délai est critique pour la stabilité et l'utilisabilité du système. Appliqué à l'interaction fortement couplée, le système comprend ici un sujet humain (l'utilisateur) et un système artificiel (ou ordinateur). Typiquement dans notre cas, un mouvement de l'utilisateur est conditionné par le retour d'information du système résultant du mouvement précédent.

**Figure 22 : Boucle de l'interaction fortement couplée
(d'après [Ware 94])**

La Figure 22 montre un exemple d'interaction fortement couplée initiée par l'utilisateur via une action physique. La sortie du système est le retour d'information de l'ordinateur. Au sein du système, on assiste à une boucle de rétroaction continue fonctionnant comme suit : l'utilisateur produit un mouvement échantillonné par l'ordinateur. Cet échantillon constitue un micro-mouvement à l'origine d'un retour d'information de l'ordinateur. Ce nouveau retour d'information est nécessaire à la génération du micro-mouvement suivant. L'interaction se termine lorsque le dernier micro-mouvement a permis d'atteindre l'état cible souhaité.

Ware et Balakrishnam affinent le modèle du système en boucle fermée sous la forme d'un cycle comprenant quatre étapes [Ware 94]. Ce cycle, représenté sur la Figure 23, débute par la perception de l'état courant de l'ordinateur (étape 1). L'utilisateur effectue un mouvement destiné à rapprocher l'état courant de l'état cible (étape 2). Le mouvement est capté par l'ordinateur (étape 3) qui calcule le nouvel état et produit le retour d'information correspondant (étape 4). L'utilisateur perçoit le nouvel état (étape 1) et débute un nouveau cycle.

**Figure 23 : Boucle de l'interaction fortement couplée
(d'après [Ware 94]).**

Comme le montre la Figure 23, chaque étape se traduit par un délai. Nous allons voir les implications des effets temporels sur la qualité d'une interaction fortement couplée. Le cycle de la Figure 23 peut aussi se voir comme le couplage de deux systèmes stimulus / réponse :

- 1 L'utilisateur pour lequel le retour d'information du dispositif de suivi constitue un stimulus qui engendre une réponse utilisateur,
- 2 Le dispositif de suivi pour lequel la réponse de l'utilisateur constitue un stimulus auquel il réagit par un nouveau retour d'information.

2.2 Latence

Pour chacun de ces deux systèmes, on définit le temps de latence (ou plus simplement, latence) qui est le temps écoulé entre la présentation d'un stimulus au système et le début de la réponse correspondante. Dans notre cas, nous avons deux types de latence : la latence système et la latence utilisateur.

La latence utilisateur est la somme des délais nécessaires au passage de l'état 4 à l'état 2. Il s'agit des délais de perception du retour d'information du système, de préparation du mouvement et d'exécution de celui-ci. En accord avec le "Modèle de Processeur Humain" de Card, Moran et Newell [Card 83], chacun de ces délais correspond au temps de traitement d'un des trois "processeurs humains" : le processeur perceptuel, le processeur cognitif et le processeur moteur. Le temps de cycle de chacun des processeurs est récapitulé dans le tableau de la Figure 24.

Figure 24 : Temps de cycle des différents processeurs du modèle du processeur humain ([Card 83]).

Le processeur de chaque individu a un temps de cycle qui lui est propre. Pour une personne donnée, son état physique et psychologique influe grandement ces valeurs. Les auteurs de ce modèle ont tenu compte de cela en mettant à jour les temps minimaux, maximaux et nominaux pour chaque processeur qui doivent être considérés comme des seuils et non comme des valeurs précises. Si on considère les personnes les plus rapides le temps de cycle et donc la latence humaine est égale à $50 + 25 + 30 = 105$ ms. Ramenons cette valeur à 100ms qui est une valeur plus exigeante (105 n'étant qu'une valeur indicative).

La latence du dispositif de suivi est la somme des délais nécessaires au passage de l'état 2 à l'état 4. Il s'agit des délais de perception du mouvement de l'utilisateur, du calcul du nouvel état et de la génération du retour d'information. Jusqu'ici, on ne s'est pas préoccupé de la notion de latence des systèmes à interface graphique classique parce que les dispositifs d'entrée impliqués convenaient aux exigences de l'interaction fortement couplée. Par exemple, entre l'arrivée de l'événement "souris déplacée" et le changement de la position du pointeur, il ne se passe que quelques millisecondes, ce qui est négligeable par rapport à la latence humaine.

Cependant, dans le cas des systèmes de réalité augmentée, les nouveaux dispositifs d'interaction (capteurs magnétiques, vision par ordinateur, etc.) et la richesse des

retours d'information de synthèse graphique mettent en jeu des coûts de calcul bien supérieurs à ceux des interfaces usuels. Dans notre cas, si on ne veut pas que le système tarde à calculer l'état suivant, il faut fixer une valeur limite à la latence système. En effet, tant que le système n'a pas renvoyé de feedback, l'utilisateur est en situation d'attente pour le micro-mouvement suivant. Avec l'hypothèse que l'utilisateur et le dispositif sont des systèmes synchrones, la latence du dispositif doit être au moins deux fois moindre que celle de l'utilisateur, soit $100 / 2 = 50$ ms.

Le premier requis pour une interaction fortement couplée est donc que la latence système soit inférieure à 50 ms. La fréquence de fonctionnement F du système est égale à $1 /$ latence du système c'est-à-dire 20 Hz. Donc, dans le cas d'une IFC le système doit avoir une fréquence de fonctionnement supérieur à 20 Hz.

2.3 Précision

Un autre requis tout aussi important pour un dispositif de suivi du doigt est la nécessité d'avoir une bonne précision. La précision est l'erreur moyenne de la mesure de la position du doigt quand le système la calcule. Il est bon de connaître l'erreur liée aux capteurs. Pour une caméra, la précision est fonction du format de numérisation et de la distance à la cible. Avec une caméra placée à deux mètres du tableau, celle-ci est de l'ordre de 3mm. Pour d'autres capteurs, la précision est en général du même ordre de grandeur.

2.4 Stabilité statique

Un dispositif de suivi est dit stable si la mesure de position ne varie pas lorsque l'entité suivie est immobile. Si la souris est un dispositif stable, il n'en va pas de même pour les dispositifs permettant une interaction à distance : capteurs à ultra son, magnétiques, infra rouge et caméra. Ces dispositifs sont soumis en permanence à des perturbations qui varient au cours du temps et qui ont pour conséquence de faire osciller les mesures de position d'un objet immobile : perturbation du champ magnétique, ou du capteur visuel des caméras.

La stabilité statique peut être mesurée en calculant l'écart type des données fournies par le dispositif pendant un cours moment. L'écart type augmente rapidement au cours du temps puis se stabilise. La stabilité statique est la valeur de l'écart type lorsqu'elle se stabilise. Il est difficile d'établir a priori la stabilité statique requise. Cependant lors d'une tâche de désignation, le modèle de l'interaction fortement couplée nous permet d'estimer la stabilité requise selon le raisonnement suivant : l'utilisateur est immobile car il ne cherche pas à effectuer de mouvement supplémentaire. Par exemple, la désignation d'un bouton se termine lorsque l'utilisateur constate que le curseur est situé à l'intérieur. L'instabilité de la mesure a pour conséquence de simuler un mouvement de l'utilisateur.

Dans le cas d'une instabilité, deux possibilités se présentent :

- 1 Le changement de position du curseur est d'une amplitude suffisante pour que l'état courant ne soit plus considéré comme satisfaisant. Le curseur passe d'une position à l'intérieur du bouton (état satisfaisant) à une position à l'extérieure (état insatisfaisant) à vis et versa ; ce qui est très gênant pour l'utilisateur et peut causer des erreurs.
- 2 Le changement de position induit par l'instabilité est d'une amplitude trop faible pour changer le caractère "satisfaisant" de l'état courant. Le curseur

reste sur le bouton et donc l'instabilité n'a pas de conséquence sur la tâche.

Ce raisonnement permet d'établir le requis de la stabilité statique pour des tâches de désignation : pour un système interactif donné, l'écart type caractérisant l'instabilité doit être inférieur à la taille de la plus petite cible que l'on peut désigner dans ce système. Ce requis est nécessaire mais pas suffisant : il peut y avoir une gêne visuelle due à l'oscillation du retour d'information.

2.5 Résolution spatiale

La résolution spatiale est la distance que doit parcourir le dispositif de pointage avant que le système prenne en compte son déplacement. Il faut que le système ait une résolution suffisamment fine pour permettre à l'utilisateur de sélectionner la plus petite cible. Par exemple, dans le cadre d'une vidéo projection du retour d'information, le vidéo projecteur étant éloigné de la surface, la taille d'un pixel sur la surface peut être très grande, voire même supérieure à la taille d'une cible physique. Si c'est le cas, l'utilisateur est dans l'incapacité de sélectionner l'objet voulu comme on le voit sur la Figure 25.

Figure 25 : La taille de plus petite cible est inférieure à la résolution spatiale : elle ne peut être sélectionnée.

La résolution spatiale doit donc être inférieure à la taille de la plus petite cible pouvant exister lors de l'utilisation du système.

2.6 Robustesse

La robustesse caractérise la précision par rapport à l'identité de l'entité suivie. En effet, l'utilisateur demande au dispositif de suivre son doigt. Il faut donc qu'à tout instant la position renvoyée par le système soit celle du doigt, et non celle d'un autre objet à proximité ou celle d'un objet ressemblant.

Le manque de robustesse du système est généralement lié aux conditions d'utilisation. Par exemple, le changement de luminosité, une couleur de l'arrière plan de l'objet trop similaire à la couleur de ce dernier ou la présence d'autres objets du même type, sont des raisons qui peuvent induire le système en erreur. De même, une rotation de l'objet ne doit pas entraîner une non-reconnaissance. En l'absence de robustesse, le système est inutilisable.

2.7 Requis lié aux caractéristiques de l'objet suivi

Le modèle de l'IFC a permis à Bérard de prédire de manière analytique la latence requise du système. Puis, il avait confirmé expérimentalement ces prédictions en mesurant la vitesse maximale de déplacement du doigt sur une surface de petite taille. Or, il semblerait que cette vitesse soit influencée par la taille de la surface comme le montre l'expérimentation suivante.

Expérimentation

En collaboration avec des psychologues de l'équipe IIHM (L. Watts) et de l'INRIA (Mireille Betrancourt et Anne Pellegrin), j'ai participé à la définition d'un protocole expérimental de mesure de la vitesse du doigt sur un tableau.

Le protocole expérimental mis en œuvre avait donc pour but de donner une vitesse maximale de déplacement du doigt lors d'une tâche de pointage. Cependant il s'est vite avéré impossible de demander à l'utilisateur de pointer un point A puis un point B sans que celui-ci, sachant qu'il était le "cobaye" d'une expérimentation, ne s'empresse de vouloir battre des records de vitesse. Cette observation a motivé une tâche de pointage combinée au dessin d'un chemin reliant les points. La tâche de l'utilisateur était donc de relier des points numérotés projetés sur le tableau. Pour que les utilisateurs ne puissent anticiper le chemin à suivre et cela sans mettre en défaut l'expérimentation, un dessin sans signification et un autre avec (un bateau) ont été testés sur 8 utilisateurs.

La production de chacun des utilisateurs a été filmée par deux caméras afin que, même si le corps de l'utilisateur masquait son action, la main de l'utilisateur se trouvât toujours dans le champ de l'une des caméras. De plus, des traits de différentes longueurs et de toutes les orientations ont été pris en compte pour l'élaboration du chemin à suivre ; ainsi les mesures acquises ne dépendent pas de la direction du mouvement lors du pointage.

Chaque point numéroté est une cible à atteindre à un moment de l'expérience. Les cibles étaient des ronds pouvant être de deux tailles possibles. La loi de Fitts [Fitts 53] explique cette précaution. Elle permet de prédire le temps moyen d'acquisition d'une cible en fonction de la taille de la cible et de la distance initiale entre l'effecteur (par exemple le pointeur de la souris) et la cible. Cette action est représentée sur la Figure 26. L'acquisition de la cible se modélise comme une séquence de micro-mouvements destinés à approcher le pointeur de la cible.

Figure 26 : Acquisition d'une cible de largeur L à une distance D du pointeur.

Ce modèle permet de montrer que le temps moyen d'acquisition d'une cible est donné par la relation suivante :

$$MT \propto \frac{1}{IP} \propto ID \quad ID \propto \log_2(2 * \frac{D}{L})$$

Où MT est le temps moyen d'acquisition de la cible, IP est l'indice de performance du dispositif de pointage étudié, ID est l'indice de difficulté correspondant à l'action d'acquisition, D est la distance initiale du pointeur à la cible et L est la taille de la cible. IP est déterminé de manière empirique. L'indice de difficulté (ID) est proportionnel au nombre de micro mouvements nécessaires. Il augmente lorsque la tâche devient plus difficile : quand la distance D augmente ou la taille L de la cible diminue. Tenant compte de ce principe, les cibles étaient de tailles différentes et réparties à des distances bien définies.

Pour l'analyse des données, chaque film a été étudié image par image, l'instant de départ d'une cible et d'arrivée à une autre a été soigneusement noté. Chacun de ces gestes a été classé par rapport à son orientation (gestes horizontaux, verticaux ou diagonaux). De plus, chaque mouvement entre deux cibles a été coupé en trois morceaux de longueur équivalente. Les résultats sont répertoriés dans le tableau de la Figure 27.

**Figure 27 : vitesse du doigt selon la direction du pointage.
(de 1 à 4 verticale, de 5 à 8 horizontale et de 9 à 16 diagonale).**

Par rapport au découpage du mouvement en trois phases, on remarque : le premier tiers correspond à une phase d'accélération, le deuxième à une phase à vitesse maximale et le dernier à une phase de décélération. La phase la plus rapide, et donc celle qui nous intéresse, est la deuxième. La vitesse moyenne de déplacement lors de cette phase est de 2 m/s, comme on le voit sur la Figure 27. Cependant certains micro-mouvements avec des valeurs de vitesse de 5 m/s ont été enregistrés. La déviation moyenne est de l'ordre de 0,9 m/s sur cette phase.

En conclusion, la vitesse maximale du doigt lors d'une tâche de pointage sur une surface varie entre 1 m/s et 3 m/s. Retenons le chiffre de 2 mètres par seconde qui est déjà une valeur impressionnante : les plus grands tableaux font 2 m de long ; cela signifie que l'utilisateur, dans sa phase la plus rapide, est capable d'aller d'un bout à l'autre en 1 seconde. Cette valeur de 2 m/s va obliger le dispositif à être suffisamment efficace pour suivre un doigt allant à cette vitesse.

3 Implémentation actuelle

Dans cette section, nous décrivons l'appareillage nécessaire à la réalisation du Tableau Magique et nous détaillons les techniques actuellement utilisées pour vérifier les requis. En ce qui concerne l'appareillage, le système inclut un projecteur vidéo et une caméra comme on le voit sur la Figure 28. Chacun d'eux définit un repère image, nécessitant une technique de changement de repère pour pouvoir trouver les coordonnées dans objet dans un repère les connaissant dans l'autre. De plus, deux sous systèmes sont utilisés : le sous-système destiné à capturer des images de bonne qualité des inscriptions du tableau (on trouvera dans [Thévenin 99] le détail de la capture du contenu à haute résolution) et le sous-système de suivi permettant l'interaction au doigt. Par la suite, nous nous attacherons principalement à détailler ce dernier sous-système.

Figure 28 : l'appareillage du tableau magique (dessin de Grégory Barborini).

Concernant la solution logicielle du Tableau Magique actuel, François Bérard [Bérard 99] a réalisé un prototype programmé en scripts Tcl. Bérard a vite compris l'intérêt de regrouper tout le code servant à la vision par ordinateur au sein d'une bibliothèque de services de vision appelée TclVision. Le principe de cette bibliothèque étant de définir une interface de programmation pour la manipulation des concepts

fondamentaux, et d'offrir les services logiciels qui implémentent cette interface. Ainsi le code écrit est capitalisé. Les services sont écrits en C++ et interfacés de manière en tcl/tk. De plus l'architecture retenue a permis à son auteur d'assurer l'indépendance des programmes vis-à-vis de la spécificité du matériel sur lesquels ils sont exécutés. Cette boîte à outils orientée vision est utilisable sur MacOS et IRIX.

Bérard a axé sa recherche sur la conception de services de vision par ordinateur satisfaisant les critères d'utilisabilité de l'Interaction Fortement Couplée en vue d'une validation expérimentale. De sa thèse ressort la création d'un suivi du doigt par corrélation qui permet son application au Tableau magique. Nous allons en décrire le fonctionnement.

3.1 Principe du suivi

Le suivi par corrélation s'inscrit dans les techniques de vision par ordinateur par apparence. Cela signifie qu'on ne cherche pas à modéliser l'objet à suivre, mais que l'on cherche à le reconnaître grâce à ses caractéristiques visuelles. En effet, lorsqu'une entité se déplace dans le champ de la caméra, son apparence ne change pas si le déplacement est une translation dans un plan parallèle à celui de l'image et si l'éclairage est constant et diffus. Le principe du suivi par corrélation consiste à mémoriser, lors d'une phase d'initialisation, l'apparence de la cible. L'ensemble des pixels ainsi mémorisés dans une image est appelé motif. En phase opérationnelle, le suivi recherche la partie de l'image la plus ressemblante au motif, la Figure 29 en illustre le fonctionnement.

Figure 29 : Suivi par corrélation, le motif (dans le cadre noir) est comparé à une sous partie de l'image en tout lieu par un parcours systématique.

La localisation du motif dans une nouvelle image s'effectue par un parcours de toutes les sous-parties de l'image de même taille que le motif. A chaque étape du parcours, le motif et la sous-partie de l'image considérée sont comparés. Cette comparaison se fait grâce à l'application de la formule suivante.

$$NCC = \frac{\sum_{u,v} M(u,v) \cdot I(x+u, y+v)}{\sqrt{\sum_{u,v} M^2(u,v) \cdot \sum_{u,v} I^2(x+u, y+v)}}$$

Figure 30 : Formule de la "Normalised Cross Correlation".

Dans la formule de la Figure 30, M est un motif rectangulaire de taille $u * v$, et I est l'image à traiter. La formule donne donc l'écart entre le motif et la partie de l'image située aux coordonnées (x, y). A la fin du parcours, on note l'emplacement de la partie la plus similaire au motif (là où l'on trouve la maximum de la fonction de corrélation). L'emplacement du pic de corrélation est élu comme nouvelle position de la cible. A chaque nouvelle image acquise par le système, une nouvelle corrélation du motif est calculée et ainsi une nouvelle position de la cible est trouvée.

Nous allons maintenant voir si ce suivi correspond à nos requis. Le premier requis à vérifier est celui de latence. D'après ce qui a été dit dans la partie 2.2, le système de suivi doit identifier la position du doigt en moins de 50 ms après la capture d'une nouvelle image. La complexité du calcul et la puissance des processeurs actuels interdisent la corrélation sur toute l'image acquise. Il faut définir une zone de recherche de taille inférieure dans laquelle le motif sera cherché comme la Figure 31 le montre. Si la fréquence de fonctionnement du système est élevée, la distance parcourue par le doigt entre deux itérations du système est réduite. La recherche peut être limitée à une zone réduite centrée autour de la dernière position connue de l'entité. Le problème étant de savoir jusqu'à quel point on peut réduire la taille de la zone de recherche. D'après le raisonnement tenu par Crowley [Crowley 95], la taille de la zone de recherche est optimale avec 88 pixels de côté. Cette valeur est valide de le cas de notre configuration et c'est donc cette valeur qui a été adoptée.

Figure 31 : Rapport des tailles de cible, motif, et zone de recherche.

Le requis de stabilité statique est vérifié : quand la cible ne bouge pas, la valeur de position de la cible donnée par le système ne change pas. Pour la résolution spatiale, celle-ci est de l'ordre de 0,3 cm, ce qui, en pratique, est inférieur à la taille de la plus petite cible. La précision est du même ordre de grandeur. Ce système de

suivi est robuste aux translations de la cible et ne se fixe pas sur une inscription ressemblant au motif. Cependant le suivi par corrélation ainsi implémenté n'est pas robuste à une rotation trop grande de la cible. En effet, suivant la position de l'utilisateur à proximité du tableau, l'orientation du doigt change comme on le voit sur la Figure 32. Le motif suivi restant constant, quand le doigt subit une rotation, la probabilité qu'il ressemble au motif baisse fortement jusqu'à la rupture du suivi (un autre objet est alors considéré par le système comme étant le doigt).

Figure 32 : Variation d'apparence de l'index en fonction de l'orientation du bras.

De plus, d'après les expérimentations menées, résumées dans la partie 2.7, la vitesse du doigt dans sa phase la plus rapide a une moyenne de 2 m/s. Avec une fréquence du système de l'ordre de 20 Hz et en supposant que le tableau rentre dans une image 800 par 600 pixels, 40 pixels séparent la nouvelle position du doigt de l'ancienne. La zone de recherche est donc de 80 pixels de côté ce qui est suffisant d'après [Crowley 95]. Cependant une vitesse de 2 m/s est une moyenne ; en effet une vitesse de 3 m/s est possible et dans ce cas le système ne peut plus suivre le doigt. Pour que le système arrive encore à suivre le doigt, son temps de latence doit être augmenté (plus de calcul à faire), ce qui est nuisible à l'interaction d'après le requis de latence.

3.2 Initialisation du suivi

Un autre problème qu'il faut souligner, réside dans la nécessité d'initialiser le suivi (dire au système quel est le motif à suivre). Même si le fait de demander à l'utilisateur d'initialiser le suivi n'est pas une entrave à l'utilisabilité du système (c'est une façon implicite de changer de mode), cette phase d'initialisation pose quelques problèmes. Pour passer dans le mode sélection d'inscription, en vue d'un "couper coller" par exemple, on demande à l'utilisateur de placer son index à l'intérieur d'un carré vert nommé "zone sensible".

Dans cette zone sensible, le système calcule une différence d'images en continu. La sous-image correspondant à cette zone active acquise à l'instant $t-1$ est comparée à celle acquise à l'instant t . Cette différence se fait par comparaison un à un des pixels. La différence d'image donne une valeur qui est la somme des carrés de la différence

entre chaque pixel situé à la même position (x,y) dans les deux images. Cette différence d'image caractérise le mouvement dans cette zone : si un objet est un mouvement dans cette zone, la valeur de la différence d'image est plus grande. En supposant que seul l'utilisateur peut passer dans cette zone (la zone est placée en haut à gauche du tableau), quand celui-ci présentera son index dans la zone sensible la valeur de la différence (nommée énergie de différence) augmentera de manière significative (voir l'illustration de la Figure 33).

Figure 33 : Energie de la zone sensible lors d'une activation du suivi.

Lorsque l'utilisateur introduit son doigt dans la zone, l'énergie calculée par la différence d'images augmente brusquement puis revient à son état "stable" quand l'utilisateur arrête son doigt dans la zone. C'est cette pause que le système détecte. Pour cela, on fixe un seuil, et quand l'énergie revient à son état "stable" en passant sous le seuil on acquiert le motif qui sera suivi par corrélation.

Cependant en situation réelle d'utilisation cela n'est pas si simple. En effet, cette phase d'augmentation brusque de l'énergie, comme la phase de diminution de l'énergie existe. L'utilisateur place bien son doigt dans la zone, mais en général il s'aperçoit que son doigt est mal centré et il le bouge un peu en direction du centre. Donc si le motif est acquis après la première stabilisation, celui-ci risque de ne contenir qu'une infime partie du doigt et ainsi une information minimale sur l'objet à suivre, ce qui a pour conséquence de rendre le suivi moins robuste. Il faudrait savoir si le motif pris est un motif discriminant : c'est-à-dire s'il correspond à une partie du doigt suffisamment conséquente. Cette technique ne permet pas cela ; nous verrons dans la partie 4.3 une technique qui permet d'obtenir cette information.

En synthèse, la technique utilisée pour l'élaboration de la version actuelle du Tableau Magique permet d'en faire le tout premier système permettant une interaction directe au doigt tout en respectant les principes de l'interaction fortement couplée. Cependant certains requis ne sont pas toujours vérifiés dans des cas critiques, Il serait bon de trouver une parade pour que la robustesse du suivi et donc de l'utilisabilité du système dans sa globalité n'en souffre pas. La partie suivante est dédiée aux propositions garantissant une meilleure robustesse.

4 Proposition

Nous venons de voir que plusieurs points dans la solution actuelle ne satisfont pas vraiment nos requis.

4.1 Approche

Pour être plus apte à garantir les requis, le dispositif de suivi doit par rapport au suivi par corrélation :

- 1- Être plus rapide pour pouvoir trouver le doigt même si sa vitesse de déplacement avoisine les 3 m/s ; cela passe notamment par la limitation de la zone de recherche.
 - 2- Être robuste aux changements de rotation du doigt.
 - 3- Utiliser un principe permettant de tester le "motif" à suivre afin de vérifier son caractère discriminant (et si possible s'il s'agit effectivement d'un doigt)
- Tout en vérifiant tous les autres requis.

Nous sommes conscients que de multiples solutions pour le suivi du doigt existent. Cependant très rares sont celles qui permettent d'avoir au final un dispositif réellement utilisable. Même la solution adoptée pour l'"Enhanced Desk" [Sato 00] , qui pourtant est impressionnante, a des limitations (cette solution a été abordée dans la partie 4.3). En effet, pour cet exemple une caméra infrarouge est utilisée. Celle-ci localise les objets ayant une certaine chaleur ; la main de l'utilisateur fait partie de ces entités. Cette technique, qui est très chère à mettre en œuvre (prix conséquent de la caméra infrarouge), est fortement limitée par un manque de robustesse lié à la présences d'autres objets chauds sur la table (par exemple une tasse de café). En plus, si la température de la pièce augmente fortement (comme c'est le cas dans la plupart des bâtiments de l'IMAG) la reconnaissance de la main et à plus forte raison son suivi sont impossible.

Ainsi nous privilégions une solution "peu complexe", (comparée aux nombreuses solutions qui utilisent des modèles 3D de la main ou encore qui utilisent des techniques basées sur les chaînes de Markov cachées pour reconnaître l'entité main grâce à sa comparaison avec d'autres entités) qui permet un suivi robuste et rapide du doigt. La technique retenue : On retient les "Rigid Contour Model" (ou RCM) [Hall 99]. Cette technique est du type suivi par apparence. En effet, le doigt a une forme bien défini qu'il paraît simple de localiser sur un fond homogène. Nous verrons aussi qu'une composition de techniques simples et rapides peut être aussi envisagées afin que les faiblesses d'une technique soient comblées par les points forts d'une autre.

4.2 Suivi par contour actif (snake)

Cette technique s'inspire du suivi par contours actifs décrit par Kass, Witkin et Terzopoulos ([Kass87], [Terzopoulos 87]) en 1987. Ils présentent leurs snakes comme un outil permettant la détection de contours et de segments et surtout le suivi d'objet. La compacité et l'efficacité du système lui ont assuré un rapide succès et l'on trouve de nombreuses publications sur des variations de sa forme originelle ([Terzopoulos 92], [Heap 95]). Le principe consiste à placer dans l'image un snake qui se colle au contour de la cible comme on le voit sur la Figure 34 tirée de [Bérard 94]. Une énergie lui est associée, fonction de sa déformation et de sa position dans l'image. Le snake cherche en permanence à minimiser cette énergie. Le snake se

stabilise sur un minimum local de son énergie qui correspond alors à la forme de l'objet suivi.

Figure 34 : Initialisation (A) et stabilisation (B) d'un snake autour d'un doigt.

Nous allons aborder les avantages et inconvénients de cette technique afin de montrer en quoi la technique de suivi par RCM, que nous décrivons ensuite, vérifie mieux notre requis.

Pour l'initialisation du suivi, cette solution technique permet de trouver le bout du doigt. Cela est possible grâce à la création de contraintes sur la forme du snake (une forme en U est préférée) comme la Figure 34 le montre. Malheureusement le snake a tendance à glisser le long du doigt si l'utilisateur fait de petits mouvements longitudinaux. Cependant on peut utiliser cette technique pour la partie initialisation du motif lors d'un suivi par corrélation par exemple . En effet on peut afficher un snake sur le tableau à l'intérieur de la zone sensible. Quand l'utilisateur y placera son doigt le snake se collera à ce dernier ; à cet instant le système pourra acquérir comme motif la sous partie de l'image contenu dans la boîte englobante du snake. La Figure 35 illustre ce raisonnement.

Figure 35 : A l'initialisation le snake peut servir à la localisation du motif à suivre pour la corrélation.

Ce suivi ne peut pas être utilisé dans notre cas, car le snake a une forte tendance lors des mouvements de l'utilisateur à se déplacer le long du doigt ce qui entraîne une non satisfaction du requis de stabilité statique. De plus de part son modèle, il arrive fréquemment que le snake s'accroche aux inscriptions qui ont une forme en U. Ces différents points rendent ce suivi inutilisable vis à vis de nos requis pour le tableau magique. Gardons simplement en mémoire qu'il est possible de l'utiliser pour l'initialisation.

4.3 Suivi par "Rigid Contour Model" (RCM)

Le suivi par RCM utilise un principe similaire au suivi par contour actif. Comme pour lui, la démarche menée par ses concepteurs est basée sur l'idée d'un suivi du doigt par rapport à sa forme caractéristique en U. Pour l'utilisateur la forme du doigt est un élément déterminant pour le classer comme étant un "doigt". Le système doit pouvoir en faire de même. Cependant comme nous l'avons vu cela n'est pas si simple.

Principe du suivi

Pour le suivi par contour actif, chaque point de l'enveloppe est pris en compte pour le calcul de l'énergie pour une position testée du doigt ; c'est à dire que l'énergie du snake dépend d'un gradient en chaque point de l'enveloppe. Le gradient utilisé est un outils mathématique permettant de savoir si un point se trouve sur une frontière. Pour le suivi pour RCM, nous définissons aussi une enveloppe. Cependant celle-ci est complètement fixe et un nombre restreint de points non contigus la définisse. Les points retenus se situent sur le contour du doigt.

Figure 36 : enveloppe du doigt ; en bleu les points calculés comme faisant partie de l'enveloppe et en rouge le point central (servant à l'initialisation du suivi).

Lors de la phase de suivi, la position et l'orientation du doigt sont déterminées en utilisant un modèle du contour rigide de la cible (celui du doigt dans notre cas). Ce modèle est constitué dans ensemble de points attachés à la cible et d'un point central comme sur la Figure 36. La mesure de la présence d'une cible à une position donnée de l'image est calculée en faisant la somme des gradients d'énergie en chaque points du modèle. Pour trouver la position et l'orientation du doigt dans l'image une nouvelle image acquise par le système on peut appliquer la formule de présence d'une cible à chaque position possible de la cible à l'intérieur d'une zone de recherche et pour chaque position possible tester toutes les orientations comme la Figure 37 le montre. La position retenue est celle où la somme des gradients en chaque point de l'enveloppe est le plus fort ; cela revient à trouver la position du point central et l'orientation adéquate de l'enveloppe pour laquelle la majorité des points sont situés sur une frontière marquée (celle existant entre le doigt et la surface). Un pseudo code de l'algorithme du suivi suit la Figure 37.

Figure 37 : Processus de rotation de l'enveloppe du doigt afin de trouver l'orientation pour laquelle la somme des gradients en chaque point est maximale (le pseudo code qui suit explique cela).

```

ALGORITHME POUR TROUVER LA POSITION DU DOIGT A L'INTERIEUR
D'UNE ZONE DE RECHERCHE EN TENANT COMPTE DES ROTATIONS
POSSIBLES

/* INITIALISATION */

GRAD = 0;
GRADMAX = 0;
POSMAX = (0,0);

/* CALCUL DE LA POSITION ACTUELLE DU DOIGT */

POUR CHAQUE POINT DE LA ZONE DE RECHERCHE (X,Y)
  PLACER LE POINT CENTRAL DE L'ENVELOPPE EN (X,Y)
  POUR CHAQUE ANGLE DE ROTATION (A) COMPRIS ENTRE 0 ET 360
  DEGRES
    FAIRE SUBIR UNE ROTATION DE (A) DE DEGRES A L'ENVELOPPE
    PAR RAPPORT AU CENTRE DE ROTATION (X,Y)
    POUR CHAQUE POINT (A,B) DE L'ENVELOPPE
      GRAD += GRAD + GRADIENT(A,B)
      SI (GRAD > GRADMAX) { GRADMAX = GRAD;
                          POSMAX = (X,Y);
                          GRAD = 0;

/* A LA FIN POSMAX CONTIENT LA VALEUR DE LA NOUVELLE POSITION
DU DOIGT */

```

Comme on peut le voir, cet algorithme est moins coûteux que celui mis en œuvre pour le suivi par corrélation car un nombre restreint de points du motif est corrélé. De plus, il faut noter qu'entre deux images acquises par le système, le doigt n'a pas le temps de subir une rotation très importante ce qu'il permet de limiter le calcul des rotations entre des angles compris entre -90 et 90 degrés par exemple (vu les degrés de liberté de la main, une rotation rapide de plus de 180 degré est impossible). Cette technique permet de suivre le doigt même si celui-ci subit des rotations pendant son parcours.

De plus ce suivi vérifie le requis de stabilité statique car la position retenue est centrée sur l'enveloppe. Le requis de résolution est lui aussi vérifié comme celui de robustesse et de précision dans le cadre de notre utilisation. Les auteurs de [Hall 99] notent aussi qu'il est possible de se servir de l'information de couleur (la couleur du doigt) à l'intérieur de l'enveloppe pour rendre le suivi encore plus robuste, cependant cela augmente fortement le coût du calcul. Mais le plus important est, qu'étant donné la faible complexité de l'algorithme utilisé la zone de recherche doit pouvoir être étendue pour permettre un suivi du doigt même pour une vitesse de déplacement avoisinant les 3 m/s.

Initialisation du suivi

Malgré tous ces points positifs, le problème à résoudre reste celui récurrent de l'initialisation du suivi afin de définir l'enveloppe à suivre par la suite. Sans une bonne initialisation, le suivi ne peut pas être robuste. Dans [Hall 99], les auteurs proposent deux solutions pour l'initialisation : premièrement une initialisation appelée "interactive" et une deuxième intitulée "automatique".

L'initialisation interactive consiste à laisser l'utilisateur placer sa main dans une zone sensible. La position du doigt dans la zone est déterminée en sélectionnant un point au milieu de celui-ci (les auteurs font la supposition que le doigt s'y trouve). A partir de ce point le système cherche deux points sur l'horizontale, une fois trouvés il cherche d'autres points dans des directions précises. Chaque point est placé à la position qui maximise le gradient sur un rayon partant du centre et allant dans une direction prédéfinie. La Figure 38 illustre ce propos. Cette technique à l'avantage de permettre la construction de l'enveloppe de la plupart des objets et donc de pouvoir les suivre lors de leurs déplacements .

Cette initialisation interactive a malheureusement un défaut. En effet, la supposition que l'utilisateur a bien centré son doigt à l'intérieur de la zone est hasardeuse et contraignante. Si l'utilisateur ne centre pas son doigt le suivi n'a pas lieu, cela l'oblige à bien le faire. La contrainte de placement est implicite, l'utilisateur ne sait pas qu'il doit placer son doigt d'une certaine façon (verticalement) pour que le suivi puisse s'initialiser. Aller placer sa main dans la zone sensible est déjà une semi-contrainte ; il ne faudrait pas que cette deuxième soit fatale à l'aspect interaction directe au doigt de notre solution. De plus la technique employée l'oblige à placer son doigt avec une certaine position qui comme nous l'avons vu dépend de la localisation de la zone sensible sur le tableau. Cependant cette initialisation semble pouvoir être une version intéressante pour notre approche.

Figure 38 : Processus d'initialisation : à gauche (A) initialisation automatique et à droite (B) initialisation interactive d'après [Hall 99].

L'initialisation automatique consiste à afficher une forme de doigt dans la zone sensible qui invite l'utilisateur à s'y placer pour déclencher le suivi (voir Figure 38). Une boucle d'initialisation a lieu dans cette zone suivant la méthode de "lancer de rayon" décrite précédemment. A chaque pas de la boucle le système teste l'enveloppe trouvée et l'affiche ; quand celle-ci s'avère être un doigt, le suivi commence. Cette solution a les mêmes problèmes interactionnels que la précédente sauf que la contrainte de placement est explicite ce qui peut limiter le temps perdu avant le début du suivi. Ces deux initialisations impliquent qu'il n'y ait pas d'inscription gênante dans la zone sensible : cela est une contrainte acceptable. Ces techniques permettent de tester l'enveloppe que le système construit ; ce qui est très utile pour éviter d'éventuelles erreurs et un gain de robustesse.

Le problème de l'initialisation peut être résolu en modifiant la méthode d'initialisation interactive. Le système utilise la technique de lancer de rayon par rapport au point central avec un calcul de gradient dans chaque direction. Je propose de faire un lancer de rayon tous les 30 degrés, soit 12 rayons. Ainsi quelque soit le sens dans lequel l'utilisateur place son doigt, l'enveloppe de celui-ci peut être trouvée. Sur la Figure 39 une position quelconque du doigt est illustrée ; les points de l'enveloppe sont ainsi trouvés et forment bien un U.

Figure 39 : Lancer de rayon dans 12 directions par rapport à un point central (point rouge), le système calcule les points composants l'enveloppe (points bleus) à l'intérieur de la zone sensible.

Grâce à l'utilisation de cette technique, l'enveloppe peut être testée afin de savoir si l'entité trouvée correspond à celle recherchée. Par exemple si l'utilisateur ne place pas son doigt au centre de la zone sensible, seule une partie de l'enveloppe (coté droit ou gauche du doigt) est trouvée par l'algorithme. Si cette enveloppe contient quelques points mais pas suffisamment on peut supposer que le doigt est mal centré. Pour que cela n'oblige pas l'utilisateur à déplacer son doigt au centre, on peut déplacer le point central pour tester d'autres positions à l'intérieure de la zone sensible. Un parcours récursif, où à chaque étape le système découpe l'image en sous zone de plus en plus petite et pour chaque point central d'une sous zone il calcul et teste l'enveloppe jusqu'à trouver une position valide, est envisable. Mais on

peut penser à d'autres techniques comme par exemple un parcours en spirale de la zone sensible ; le parcours s'arrête quand le système trouve une position où l'enveloppe est satisfaisante par rapport au nombre de points trouvés et à la forme de celle-ci. Si aucune enveloppe correcte n'est trouvée l'algorithme repart sur la position centrale.

4.4 Adapter la zone de recherche

Pour le suivi différentes techniques de parcours de la zone de recherche minimisant le coût total de l'algorithme peuvent être mises en place, car parcourir toute la zone de recherche est très coûteux. Si on pouvait limiter le nombre de position testée l'algorithme serait beaucoup plus rapide. Dans [O'Hagan 1997], les auteurs proposent d'adapter la zone de recherche suivant la réussite ou non d'un suivi par corrélation. La zone de recherche est placée par rapport à la direction du mouvement. Cette direction est calculée par la droite passant par la position N-1 et la position N (position courante) du doigt. A partir de la direction de recherche, le système calcule la zone de recherche en prenant en compte un angle d'ouverture qui varie selon la réussite du suivi. Si le suivi trouve la cible sans difficulté, alors l'angle α pris en compte est réduit jusqu'à une certaine valeur limite (15 degré est la valeur proposée par les auteurs). Quand le suivi ne trouve pas la cible dans le triangle de recherche, l'angle α augmente pour atteindre petit à petit une valeur maximale de 180 degrés. La zone de recherche est dirigée par un angle allant de $-\alpha$ à $+\alpha$ dans la direction du mouvement comme la Figure 40 le montre.

Figure 40 : La zone de recherche est calculée par rapport à la direction du mouvement et à un angle alpha contrôlé par le système.

Le but annoncé par les auteurs est de permettre de retrouver la cible quand le suivi semble l'avoir perdue. La position courante de la cible est placée légèrement à l'intérieur de la zone de recherche pour une meilleure efficacité. Nous pensons en perspective à cette réflexion qu'adapter l'angle qui définit la zone de recherche en fonction de la vitesse de déplacement du doigt est une solution possible pour permettre au suivi d'être robuste à des déplacements avoisinant les 3 m/s. Notre supposition est motivée par le fait que lors d'une tâche de pointage sur le tableau, afin par exemple de sélectionner des inscriptions, plus le doigt de l'utilisateur va vite

et plus son mouvement est contraint, c'est à dire que la probabilité que son mouvement subisse un fort changement de direction est infime. Bien entendu cela reste à vérifier expérimentalement. Cependant si c'est le cas alors on peut adapter la zone de recherche de la manière suivante.

Figure 41 : Recomposition de la zone de recherche suivant une forme plus efficace. A gauche une zone de recherche conventionnelle et à droite une zone de recherche adaptée ayant la même surface.

Comme le montre la Figure 41, la zone de recherche peut être recomposée pour prendre la forme d'un triangle ce qui équivaut à un angle θ de 45 degrés. Cette zone de recherche en triangle permet de trouver une cible allant à une vitesse proche de 3m/s. En effet, si l'on place la zone de recherche en triangle, comme le montre la Figure 42, un déplacement de la cible de 60 pixels (équivalant à une vitesse de 3 m/s : la distance D) peut être pris en compte par le système.

Figure 42 : Comparaison entre une zone de recherche carré et une zone de recherche triangulaire. La distance D pouvant être parcourue par la cible dans la direction

courante est valide pour un mouvement avoisinant les 3 m/s.

Utiliser cette méthode semble être une approche possible pour permettre au dispositif de suivi d'être robuste à des mouvements très rapide sur le tableau. Cette méthode est raisonnable car pour notre application les mouvements du doigt sont assez linéaires. Si cette méthode est validée par des tests expérimentaux, il sera alors possible de relier la valeur de l'angle θ avec la vitesse du doigt qui peut être estimée par le système grâce à la connaissance des positions précédentes du doigt. Quand le doigt aura une grande vitesse, le système pourra réduire l'angle et ainsi trouver la position suivante du doigt.

4.5 Récapitulatif

Nous avons vu que plusieurs techniques du suivi du doigt existent. Cependant rares sont celles qui vérifient tous les réquis techniques fixés. L'utilisation du suivi par "Rigid Contour Model" semble être une des rares solutions peu complexes permettant cette vérification des requis. De plus cette méthode est souple car elle permet de suivre un stylo ou une brosse, ce qui dans notre cas est très intéressant. Cependant comme nous l'avons montré, il faut modifier la méthode d'initialisation de l'enveloppe pour que celle-ci soit efficace, et donc que pour l'utilisateur le fait de vouloir passer en mode suivi ne soit pas une épreuve de force. Avoir un suivi permettant une robustesse à une vitesse du doigt maximale s'avère être la chose la plus délicate. Notre proposition qui consiste à adapter la forme de la zone de recherche en fonction de la vitesse du doigt doit être testée, néanmoins elle est une piste vers la satisfaction de tous nos requis et la mise en œuvre d'un dispositif de suivi permettant une interaction fortement couplée.

4.6 Problèmes interactionnels

Changement de mode

Un problème rarement abordé dans la littérature, car il n'est pas vraiment considéré comme tel dans le domaine de la vision par ordinateur, est comment l'utilisateur doit procéder pour passer du mode suivi au mode écriture. En vision, la solution majoritairement envisagée est de casser le suivi ; c'est à dire faire un mouvement brusque et rapide qui ne permet plus au système de trouver la cible. Cette approche mélange deux choses distinctes : le passage à un mode souhaité par l'utilisateur et un manque de robustesse du système, ce qui n'est pas très cohérent. Il serait intéressant de trouver un geste simple facilement compréhensible par le système qui permettrait de signifier que le suivi doit cesser. Au cours de l'utilisation du tableau, l'utilisateur peut avoir envie de dupliquer un tableau ; pour cela il passe son doigt dans la zone sensible et déclenche le suivi. Si à cet instant il se rend compte qu'il a oublié de dessiner une colonne au tableau il faut qu'il puisse repasser en mode écriture rapidement pour compléter celui-ci. Trouver le geste miracle est à l'heure actuelle un souhait qu'il faut placer en perspective à cette étude.

Activation des commandes système

Un autre problème est lié à l'activation des commandes système. Avec une interface graphique usuelle l'accès aux menus permet à l'utilisateur de signifier au système la commande à effectuer. Par exemple dans le cadre du tableau magique, il faut pouvoir dire au système qu'une partie des inscriptions doit être dupliquée.

L'utilisateur doit pouvoir activer la commande "copier" puis sélectionner les inscriptions. Le système doit alors créer des inscriptions électroniques équivalentes et les placer où l'utilisateur le désire. Dans la version actuelle du tableau magique une colonne d'items est projetée sur la surface après que l'utilisateur est placé son doigt dans la zone sensible. L'utilisateur est alors convié à choisir la commande désirée en positionnant son doigt dessus.

Cette façon de procéder pose de graves problèmes de vision par ordinateur. En effet pour le système trouver le doigt dans une zone où est projetée le dessin d'une disquette (item signifiant la sauvegarde du contenu) par exemple est quelque chose de plus complexe que de trouver le doigt sur un fond blanc. Ainsi avec ce mode de fonctionnement, l'activation des menus est extrêmement délicat du fait que le dispositif de suivi a une grande instabilité statique. Cette instabilité s'explique par le fait que la corrélation avec le motif acquis n'est pas certaine, l'information doigt dans le motif n'est pas assez discriminante par rapport à l'information fond du motif qui ne correspond pas au dessin projeté sur la surface.

Pour éviter ce problème, nous proposons d'utiliser des menus rythmiques comme proposé dans [Maury 99] pour raccourcir la tâche de sélection d'un item. Un menu rythmique ressemble à un menu conventionnel, comme lui il se compose d'un ensemble d'items juxtaposées verticalement. Cependant nul besoin de déplacer le dispositif d'acquisition (la souris ou le doigt) sur un item pour l'activer. Une fois le menu sélectionné, les item sont sélectionnés un à un pendant un temps donné. Un rythme gère le passage d'un item à l'autre. A chaque fois que la sélection courante change d'item un bruit est produit ("clic") et le nouvel item sélectionné change de couleur pour signifier sa sélection.

Dans le cadre du tableau magique, c'est quand l'utilisateur place son index dans la zone sensible que le menu s'affiche. La Figure 43 illustre l'explication qui suit. A cet instant les items du menu sont tour à tour sélectionnées de la première située en haut (item 1 sur la figure) à la dernière placée en bas (item 5). Quand la sélection du dernier item se termine, le système sélectionne à nouveau le premier et le cycle continu. L'utilisateur attend que le système sélectionne l'item désiré (cela prend quelques millisecondes), quand la sélection arrive sur celui de son choix, il retire son doigt de la zone sensible.

Figure 43 : Fonctionnement du menu rythmique. Les items sont sélectionnés tour à tour par le système.

Retirer le doigt de la zone est pour le système un événement ; la commande choisie à l'instant du retrait du doigt est alors activée. Ainsi tout problème de suivi est inhibé. Il n'y a plus d'erreur de sélection d'un item car celle-ci se fait sans déplacement du doigt. Cependant il faut prévoir un item qui permet de signifier au système que l'utilisateur ne veut choisir aucune des commandes possibles. De cette façon si l'utilisateur a demandé l'apparition du menu et qu'après coup il ne veut plus activer une commande il peut sortir du menu sans dommage.

La zone sensible sert de point d'entrée pour l'activation des commandes système. Cette zone doit être placée à un endroit précis sur le tableau ; si possible dans un coin où les inscriptions sont rares pour éviter les problèmes d'initialisation de l'enveloppe. C'est pourquoi dans la version actuelle celui-ci est situé en haut à gauche du tableau. Notons que si l'utilisateur est en train d'écrire à droite sur la surface, la zone sensible est loin de lui, ce qui l'oblige à se déplacer. Nous proposons donc de mettre deux zones sensibles sur la surface : une à gauche et une autre à droite, ainsi la tâche articulatoire de déplacement est réduite. De plus, par la suite il serait utile d'étudier les avantages et inconvénients d'une zone sensible déplaçable. Pour cela deux possibilités existent. Premièrement, le déplacement de la zone est faite par l'utilisateur. Deuxièmement, le déplacement est géré par le système qui est capable de localiser l'utilisateur devant la surface et affiche la zone sensible par exemple à 50 cm à droite ou à gauche de sa tête afin qu'elle soit toujours dans le périmètre d'action de l'utilisateur.

La dernière proposition pour améliorer l'interaction avec le contenu et le système est de mettre en place une sélection en forme de patate et non une sélection rectangulaire comme la majorité des autres systèmes le permettent. En effet une sélection en "patatoïde" est plus en accord avec la topographie des inscriptions sur la surface. Une sélection rectangulaire ne permet pas de sélectionner des inscriptions finement. Le suivi du doigt que nous avons proposer devrait permettre une sélection en forme de patate car il est robuste au rotation du doigt qui sont nombreuses lors de la délimitation des inscriptions à sélectionner .

5 Conclusion

Nous avons proposé des améliorations pour mettre en œuvre un dispositif de suivi de doigt performant vérifiant tous nos requis. Nous avons aussi émis des hypothèses de travail qu'il faudra valider par la suite avec des tests expérimentaux. Ainsi mis en situation effective d'utilisation, nous pourrions tirer encore d'autres enseignements sur ces techniques de suivi. Notons que la coopération de techniques simples s'avère à notre avis, le meilleur moyen pour parvenir à mettre au point un dispositif de suivi utilisable lors d'une interaction directe au doigt.

L'algorithme de suivi par "Rigid Contour Model" est en cours d'implémentation et sera intégrée à terme à TclVision. Une fois tous ces techniques réunies au sein d'une même bibliothèque, il sera plus simple, pour nous concepteurs, de mettre en place notre solution : le tableau magique. Le portage de TclVision sur PC, que j'ai effectué, devrait permettre une utilisation de notre solution par un plus grand nombre d'utilisateurs.

De plus par notre étude nous avons mis en évidence d'autres problèmes liés au changement de mode. Passer du mode écriture au mode suivi du doigt (pour la

commande du système) par l'intermédiaire d'une zone sensible permet de rendre conscient l'utilisateur de ce changement tout en gardant une simplicité interactionnelle. Nous avons aussi montré que mettre en œuvre une solution tel que le Tableau Magique ne revenait pas à faire sortir basiquement le système de sa boîte par une simple vidéo projection ; mais qu'il s'agit d'un vrai processus de questionnement à effectuer afin de ne pas faire des choix arbitraires, ce qui a souvent été fait par le passé (témoin, le MagicBoard).

Conclusion

Cette étude sur les surfaces d'information démontre la diversité des solutions techniques au problème de la conception et de la mise en œuvre de dispositifs au service de la réflexion et de la mémorisation de productions collectives ou individuelles. Sous son apparente simplicité, une surface d'information révèle un foisonnement de concepts qu'il nous a fallu organiser.

En conclusion, nous rappelons les éléments clefs de la contribution qui conduisent à leur tour à de nouvelles pistes de recherche.

1 Synthèse de la contribution

Cette recherche de DEA contribue à la fois au domaine de l'Interaction Homme Machine et à la Vision par Ordinateur en quatre volets complémentaires. Elle inclut :

- Un état de l'art des surfaces d'information,
- Un espace de conception permettant de situer les solutions existantes, d'expliquer ou de prévoir des problèmes d'utilisabilité avec l'offre actuelle, mais aussi d'entrevoir de nouvelles options,
- Une étude comparative de techniques de suivi de doigt avec une attention particulière portée sur un point dur : l'initialisation du suivi de doigt.
- Le portage sur PC d'une bibliothèque de services de base en vision développée dans l'équipe IIHM pour MacOS.

Etat de l'art. S'il est simple d'emploi et toujours disponible, le tableau conventionnel rend malaisée la réorganisation d'information et ne permet pas l'archivage de la production. Les tableaux électroniques et les tableaux augmentés visent à combler ces lacunes. Les premiers, avec leurs capteurs intégrés sont des dispositifs conçus à façon tandis que pour les seconds, capteurs et effecteurs sont accolés ou externes. Cette différence de conception technique conditionne l'utilisabilité de l'appareil.

L'espace de conception présenté au chapitre 2, permet d'explicitier les différences d'utilisabilité de l'existant. Il permet aussi d'entrevoir de nouvelles possibilités avec la composition de surfaces élémentaires dont la topologie peut varier dynamiquement. Les notions de surfaces brute, captée et projetée permettent de raisonner sur la bonne correspondance entre l'offre technique et l'attente utilisateur. Dans cet espace, nous retenons l'amplification par la vision par ordinateur, technique non intrusive mais complexe à maîtriser.

L'application de la Vision par Ordinateur à l'IHM est un phénomène récent. Peu de solutions opérationnelles répondent aux requis de l'IHM. Dans ce DEA, on s'est penché sur le problème de la robustesse du suivi de doigt tout en veillant à satisfaire le requis de latence sans contraintes rédhibitoires pour l'utilisateur. Des mesures de la vitesse de doigt en situation d'interaction au tableau révèlent une vitesse de déplacement pouvant atteindre 3m/sec. Or, la technique de suivi disponible pour le

démonstrateur du Tableau Magique s'appuie sur une hypothèse de 2m/sec. Je propose une analyse comparative de plusieurs techniques (contour actif, contour rigide) et propose une technique d'initialisation qui favorise le succès du suivi.

2 Perspectives

Les perspectives nourrissent des objectifs à court et à plus long terme :

À court terme, il s'agit de mesurer les performances de la technique de suivi implémentée, puis de l'intégrer dans le démonstrateur du Tableau Magique. On pourra alors pratiquer une seconde campagne de tests en situation réelle d'interaction.

A moyen terme, et ceci fera l'objet d'un Magistère, il s'agira d'étudier la configuration dynamique de surfaces hétérogènes avec l'ajout d'un Palm Pilot au Tableau Magique. On étudiera la faisabilité logicielle de la migration d'information entre des surfaces d'information élémentaires aux caractéristiques interactionnelles bien distinctes.

À plus long terme, on envisage l'utilisation à plusieurs que les utilisateurs soient co-localisés ou distants. Il faudra alors se préoccuper, non seulement des propriétés de l'IHM propres à la communication médiatisée (conscience de groupe, tour de parole, etc.), mais aussi aux architectures logicielles réparties.

Bibliographie

[Bérard 94]

François Bérard : DEA d'Informatique de l'université Joseph Fourier. Vision par Ordinateur pour la Réalité Augmentée : Application au Bureau Numérique. 22 juin 1994.

[Bérard 99]

François Bérard : Thèse de l'université Joseph Fourier : Vision par ordinateur pour l'interaction fortement couplée.

[Bly 88]

Sara A. Bly. A use of drawing surfaces in different collaborative settings. *Proceedings of the conference on Computer-supported cooperative work* , 1988, Pages 250 - 256

[Brinck 92]

Tom Brinck, Louis M.Gomez : A Collaborative Medium for the Support of Conversational Props. CSCW 92 proceedings. Pages 171-178.

[Card 83]

Card, S.Moran, T.Newell,A. "The Psychology of Human-Computer Interaction", Lawrence Erlbaum Associates,1983.

[Crowley 95]

Crowley,J.L. Bérard, F. et Coutaz, J. "Finger Tracking as an Input Device for Augmented Reality", International Workshop on Automatic Face And Gesture Recognition (AFGR), 1995.

[Elrod 92]

Scott Elrod, richard Bruce, Rich Gold, David Goldberg, Frank Halasz, William Janssen, David Lee, Kim McCall, Elin Pedersen, Ken Pier, John Tang, Brent Welch : LIVEBOARD : a large interactive display supporting group meetings, presentations and remote collaboration. CHI 92. Pages 599-607

[Fjeld 98]

Fjeld, M. Bichsel, M and Rauterberg, M. BUILT-IT : an intuitive Design tool based on direct object manipulation. Dans I. Wachsmut & M. Frölich (eds) *Gesture and Sign Language in Human-Computer Interaction (GW)*, Lecture Notes in Artificial Intelligence, Vol. 1371, Ppages 297-308. Berlin : Sprnger-Verlag, 1988

[Fitts 53]

Fitts, P. M. "The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement". *Journal of Experimental Psychology*. P381-391, 47, 6, 1953.

[Fitzmaurice 95]

Fitzmaurice, G. Ishii, H and Buxton, W. Bricks : laying the foundations for graspable user interfaces. ACM conference on Computer-Human Interface (CHI), 1995. Disponible sur le site :

[Http://www.dgp.utoronto.ca/people/GeorgeFitzmaurice/](http://www.dgp.utoronto.ca/people/GeorgeFitzmaurice/)

[Fitzmaurice 96]

Fitzmaurice, G. Graspable user interfaces. Phd Thesis, Computer Science Department, University of Toronto, 1996. Dispon Disponible sur le site :

[Http://www.dgp.utoronto.ca/people/GeorgeFitzmaurice/](http://www.dgp.utoronto.ca/people/GeorgeFitzmaurice/)

[Guiard 99]

Yves Guiard. L'IHM aux yeux des sciences cognitives : une image à renforcer. IHM 99. Pages 41-46

[Hall 99]

Daniela Hall et James L. Crowley . Tracking Fingers and Hand with a Rigid Contour Model in an Augmented Reality. Managing Interactions in Smart Environments (MANSE '99). Décembre 1999.

[Heap 95]

Tony Heap et Ferdinando Samaria. Real-Time Hand Tracking and Gesture Recognition Using Smart Snakes. Technical Report, Olivetti Research Limited 1995.

[Ishii 92]

Hiroshi Ishii, Minoru Kobayashi : CLEARBOARD : A Seamless Medium for Shared Drawing and Conversation with Eye Contact. CHI 92. Pages 525-532.

[Ishii 97]

Hiroshi Ishii and Brygg Ullmer. Tangible bits : towards seamless interfaces between people, bits and atoms. *Conference proceedings on Human factors in computing systems* , 1997, Pages 234 - 241

[Kass87]

M. Kass, A. Witkin, D. Terzopoulos. "Snakes : Active Contour Models". Proceeding First International Conference on Computer Vision. Pages 259-268.

[MacKenzie 93]

MacKenzie, I. S. Ware, C. "Lag as a determinant of Human Factors in Computing Systems". Conference of Human Factors in Computing Systems (INTERCHI), Pages 488-493, ACM Press, 1993.

[Maury 99]

Sébastien Maury, Sylvie Athènes, Stéphane Chatty. Vers une interaction basée sur le rythme : les menus rythmiques. 11ème conférence francophone sur l'Interaction Homme-Machine. IHM 99 Montpellier. Pages 29-32 Tome 2.

[Moran 95]

Thomas P. Moran, Patrick Chiu, William van Melle and Gordon Kurtenbach. Implicit structure for pen-based systems within a freeform interaction paradigm. *Conference proceedings on Human factors in computing systems* , 1995, Pages 487 - 494

[Moran 97]

Thomas P.Moran, Patrick Chiu, William van Melle : Pen-Based Interaction Techniques Organizing Material on an Electronic Whiteboard. UIST 97. Pages 45-54

[Moran 98]

Thomas P.Moran, William van Melle, Patrick Chiu : Tailorable Domain Objects as Meeting Tools for an Electronic Whiteboard. CSCW 98. Pages 295-304

[Moran 99]

Thomas P.Moran, Eric Saund, William van Melle, Anuj U.Gujar, Kenneth P. Fishkin, Beverly L.Harrison : Design and Technology for Collaborage : Collaborative collages of Information on Physical Walls. UIST'99. Pages 197-206

[Mynatt 99a]

Elizabeth D.Mynatt : The Writing on the Wall. INTERACT'99. Pages 196-204

[Mynatt 99b]

Elizabeth D. Mynatt, Takeo Igarashi, W. Keith Edwards, Anthony LaMarca. Flatland : New Dimensions in Office Whiteboards. CHI 99. Pages 346-353.

[Nakagawa 97]

Masaki Nakagawa, Tsuyoshi Oguni and Takashi Yoshino. Human interface and applications on Ideaboard. INTERACT'97. Pages 501-508

[Newman 92]

William Newman and Pierre Wellner. Adesk supporting computer-based interaction with paper documents.CHI'92. Pages 587-592

[O'Hagan 97]

R. O'Hagan et A. Zelinsky . "Finger Track - A Robust and Real-Time Gesture Interface", Advanced Topics in Artificial Intellingence, Tenth Australian Joint Conference on Artificial Intelligence (AI'97) Proceedings, Pages 475-484. Decembre 1997.

[Pedersen 93]

Elin Rønby Pedersen, Kim McCall, Thomas P. Moran and Frank G. Halasz. Tivoli: an electronic whiteboard for informal workgroup meetings. *Conference proceedings on Human factors in computing systems* , 1993, Pages 391 - 398

[Rauterberg 98]

Rauterberg, M. Fjeld, M. Krueger, H. Bishel, M. Leonhart, U. and Meier, M. BUILT-IT : a planningtool for construction and design. ACM conference on Computer-Human Interaction (CHI) conference compagnion, 1998

[Sato 00]

Yoichi Sato, Yoshinori Kobayashi et Hideki Koike. Fast Traching for Hands and Fingertips in Infrared Images for Augmented Desk Interface. Fourth International Conference on Automatic Face and Gestue Recognition. FG 2000 Pages 462-467

[Saund 94]

Eric Saund and Thomas P. Moran. A perceptually-supported sketch editor. *Proceedings of the ACM symposium on User interface software and technology* , 1994, Pages 175 - 184

[Saund 96]

Eric Saund : Image Mosaicing and a Diagrammatic User Interface for an Office Whiteboard scanner. Site internet, Xerox Palo Alto Research Center.

<http://www.parc.xerox.com/spl/members/saund/>

[Sellen 92]

A. Sellen, G.P. Kurtenbach, W. Buxton. The prevention of mode errors through sensory feedback, Human Computer Interaction, Lawrence Erlbaum, Vol 7, No 2, 1992. Pages 141-164

[Shipman 95]

Frank M. Shipman, Catherine C. Marshall and Thomas P. Moran. Finding and using implicit structure in human-organized spatial layouts of information. *Conference proceedings on Human factors in computing systems* , 1995, Pages 346 - 353

[Stafford-Fraser 96]

Quentin Stafford-Fraser, Peter Robinson. BrightBoard : A video-Augmented Environment. CHI 96. Pages 134-141

[Stefik 87]

Mark Stefik, Gregg Foster, Daniel G. Bobrow, Kenneth Kahn, Stan Lanning, Lucy Suchman : Beyond the Chalkboard : computer support for collaboration and problem solving in meetings. ACM 87 volume 30. Pages 32-47

[Tang 91]

John C. Tang, Scott L. Minneman : VIDEOWHITEBOARD : video shadows to support remote collaboration. Human factors in computing systems conference proceedings on Reaching through technology 1991. Pages 315-322

[Terzopoulos 87]

D. Terzopoulos, A. Witkin, M. Kass. "Energy constraints on deformable models : Recovering shape and non-rigid motion". Proceeding International Conference on Computer Vision. Pages 266-275

[Terzopoulos 92]

D. Terzopoulos, R. Szeliski. "Tracking with Kalman Snakes". In "Active Vision", The MIT Press, 1992.

[Thévenin 99]

D. Thevenin, F. Bérard et J. Coutaz. "Capture d'Inscriptions pour la Réalité Augmentée". In proceedings of IHM'99. (Conférence AFIHM sur l'Interaction Homme-Machine, 22-26 Novembre 1999 Montpellier, France) Pages 174-180

[Ullmer 97]

Ullmer, B. and Ishii, H. The MetaDESK : models and prototype for tangible user interfaces. ACM conference on User Interface Systems and Toolkits (UIST), 1997.

[Ware 94]

Ware, C. et Balakrishnan, R. "Reaching for Objects in VR Displays : Lag and Frame Rate". ACM Transactions on Computer Human Interaction (TOCHI), Vol. 1, No 4, p331-356, Décembre 1994.

[Wellner 91]

Pierre Wellner. The digital desk calculator : Tangible manipulation on a desk top display. UIST'91. Pages 27-33

[Whittaker 95]

Steve Whittaker, Heinrich Schwarz : Back to the future : pen and paper technology supports complex group Coordination. CHI 95. P346-353.

Annexe 1

[Anoto]

ANOTO. "If imagination is limitless, what would you do with this pattern?", site internet, http://www.anoto.com/index_main.asp

[Bluetooth]

www.bluetooth.com

[Copyboard]

PLUS. "PLUS Electronic Copyboard Series", site internet, <http://www.plus.co.jp/intl/dmt/PDT.htm>

[Ebeam]

Ebeam. "eBeam hold that thought!", site internet, <http://www.e-beam.com/>

[Ibid]

MicroTouch. "Ibid Product Line Overview", site internet, <http://www.microtouch.com/ibid/overview.htm>

[IdeaBoard]

3m. "IdeaBoard IB 3000 Series : Key Features", site internet, http://www.3m.com/meetings/ams/111_wbd.html

[Interactive Whiteboard]

Numonics. "Interactive Products Division", site internet, <http://www.numonics.com/ipd.htm>

[Mimio]

Virtual Ink Inc. "MIMIO: Technical Specifications", site internet, 1999. <http://www.virtual-ink.com/>

[Panaboard]

Panasonic. "The Office Electronique White Boards", site internet, <http://www.panasonic.com/office/ewb/ewb.html>

[Quora]

PROMETHEAN. "The Quora Interactive Whiteboard", site internet, <http://www.promethean.co.uk/qiw1.htm>

[SmartBoard]

Smart Technologies Inc. "SmartBoard: technical specifications", <http://www.smarttech.com/>

[SoftBoard]

Microfield Graphics Inc. "SoftBoard: technical specifications", site internet. Disponible sur le site : <http://www.softboard.com/>

[StarBoard]

Hitachi Software. "StarBoard Hardware Advantage", site internet, <http://www.hitachi-soft.com/whiteboards/hardware.htm>

[Teamboard]

TEAMBOARD. "Teamboard an electronic whiteboard and interactive touch screen", site internet, <http://www.whiteboard.com/>

[VideoBrush]

PICTUREWORKS. "VideoBrush Whiteboard", site internet, <http://www.pictureworks.com/videobrush/products/whiteboard/>