HAL
open science

Contribution à l'étude de la perception kinesthésique dans la communication homme-machine. Etude et expérimentations d'interfaces à retour d'effort multi-degrés de libertés

Ali Bouzouita

To cite this version:

Ali Bouzouita. Contribution à l'étude de la perception kinesthésique dans la communication homme-machine. Etude et expérimentations d'interfaces à retour d'effort multi-degrés de libertés. Interface homme-machine [cs.HC]. Institut national polytechnique de Grenoble, 1997. Français. NNT : . tel-01271726

HAL Id: tel-01271726

https://hal.science/tel-01271726v1

Submitted on 9 Feb 2016

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

399

THÈSE

présentée par

Ali BOUZOUITA

pour obtenir le grade de **DOCTEUR**

de l'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE GRENOBLE

(arrêté ministériel du 30 mars 1992)

(Spécialité : Signal-Image-Parole)

CONTRIBUTION À L'ÉTUDE DE LA PERCEPTION KINESTHÉSIQUE DANS LA COMMUNICATION HOMME-MACHINE

Étude et Expérimentations d'interfaces à retour d'effort multi-degrés de libertés

---

Date de soutenance : 8 Avril 1997

Composition du jury :

M.	Jean-Marc DOLMAZON	Président du jury
M.	Jean-Pierre POITOU	Rapporteur
M.	Christophe CHAILLOU	Rapporteur
Mme	Noëlle CARBONELL	Examinatrice
M.	Claude CADOZ	Directeur de thèse
Mme	Annie LUCIANI	Invitée

ACROE (Association pour la Création et la Recherche sur les Outils d'Expression)

CLIPS (Communication Langagière et Interaction Personne Système)

46, av. Félix Viallet, 38031 Grenoble Cedex

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier Messieurs Christophe CHAILLOU, Jean-Marc DOLMAZON, Jean-Pierre POITOU et Madame Noëlle CARBONELL qui m'ont fait le plaisir et l'honneur de faire partie de mon jury de thèse.

Un très grand merci à Claude CADOZ qui m'a encadré pendant trois ans. J'exprime ma vive reconnaissance à Annie LUCIANI pour son enthousiasme et son intervention dans différentes situations délicates, Jean-Loup FLORENS pour toutes les discussions intéressantes dont l'apport a été important et stimulant.

Merci beaucoup à tous les chercheurs, ingénieurs et doctorants de l'ACROE : Éric INCERTI, Claude UHL, Benoît CHANCLOU et surtout Arash HABIBI, mes compagnons de route pendant la rédaction, Jamel NOUIRI pour son soutien continu, Olivier GIRAUD pour ses remarques et son aide sur certains aspects de la programmation temps réel, sans oublier Patrick REBOUD, Arnaud GODARD, Patrick FOURCADE, Pirouz DJOHARIAN, Nicolas SZILAS et Christophe DISCOURS.

Le soutien humain de Maria GUGLIELMI, Guy DIARD et Martial BARRACO.

Je remercie Ambarish GOSWAMI pour tous ses conseils en mécanique et sa disponibilité.

Je remercie enfin tous mes amis qui m'ont aidé de près ou de loin, ...

à mes parents

sans qui, à tout point de vue, je n'en serai pas là

et à Boudour, Lamia, Walid et Karim...

Sommaire

Introduction générale 1

Partie A - L'INTERACTION GESTUELLE

Chapitre 1 : Interface Multisensorielle 11

1. Les systèmes Multimédias et Multimodaux 13
2. Les réalités virtuelles 16
3. Les interfaces d'Entrée 17
   - 3.1. Taxonomie des interfaces d'entrée selon Buxton 18
   - 3.2. Taxonomie des interfaces d'entrée selon Mackinley et coll. 19
   - 3.3. Taxonomie des interfaces d'entrées selon Lipscomb 20
4. Taxonomie des interfaces à retour-d'effort 23
   - 4.1. Les paramètres caractérisant notre Taxonomie 23
5. Taxonomie des interfaces de sorties 26
6. L'Interface de Communication Instrumentale 26
7. Conclusion 28

Chapitre 2 : Psychophysique 29

1. Les étapes de la psychophysique 29
2. Méthodes psychophysiques classiques pour la détermination du seuil absolu et différentiel 33
   - 2.1. Méthode des stimuli constants 34
   - 2.2. Méthode des limites 35
   - 2.3. Méthode des ajustements 36
3. Conclusion 37

Chapitre 3 : Les fonctionnalités du geste 39

1. Les fonctionnalités du geste 40
2. La fonction épistémique 42
   - 2.1. Physiologie de la perception proprio-tactilo-kinesthesique 42
   - 2.2. Étude sur les perceptions d'environnement simple 43
   - 2.3. Perception d'environnements complexes 44
   - 2.4. Effet de la dynamique du manipulateur sur les mouvements de la main 46
3. Les fonctions ergotique et sémiotique 47
   - 3.1. Mouvement dirigé de la main 47
   - 3.2 Classification de la fonction sémiotique 51
4. Conclusion 52

Chapitre 4 : Éléments de Typologie des tâches instrumentales humaines 53

1. Caractérisation de l'environnement 55
2. Caractérisation de l'objet manipulé 55
3. Caractérisation de l'opérateur 57
4. Caractérisation de quelques tâches 58
   - 4.1. Conditions de réalisation de la tâche 58
   - 4.2. Les opérateurs sur les tâches 59
   - 4.3. La tâche de positionnement 59
   - 4.4. La tâche de saisie 60
   - 4.5. La tâche de déplacement 61
   - 4.6. La tâche d'assemblage 61
   - 4.7. Tâches téléopérées 62
   - 4.8. La tâche de conduite d'un mobile 62
   - 4.9. Tâche de coopération instrumentale entre deux opérateurs 62
5. Le cadre pour l'étude d'une tâche 63
6. Conclusion 66

Chapitre 5 : L'Anamorphose 67

1. L'anamorphose 69
   - 1.1. Activité comparative et effet de contexte 69
   - 1.2. Définition dans la littérature 70
   - 1.3. Les phénomènes ou "signaux" sujets à anamorphose dans la situation instrumentale 71
2. Quelques paramètres simples d'anamorphose 73
3. Point de vue 75
4. Classes d'anamorphoses 75
5. Degré d'anamorphose 76
6. Quelques exemples d'anamorphoses 77
   - 6.1. Les anamorphoses élémentaires 77
   - 6.2. Anamorphose combinant plusieurs canaux 80
7. Conclusion 82

Partie B - EXPÉRIMENTATIONS

Chapitre 6 : Matériel Expérimental 87

1. Architecture Temps Réel 87

1.1. Répartition des processus 89
2. Le clavier rétroactif modulaire 90
3. Analyse et calibrage du clavier 91
4. Primitives réalisées pour l'interaction 94
5. Dimensionnement du stick 2D 95
6. Problème du couplage utilisateur/simulation 98
7. Mise au point de l'expérience 100
8. La notion d'instrument hybride réel-virtuel 101
9. Conclusion 102

Chapitre 7 : Expériences Préliminaires 103

1. Analyse de la manière de tenir de l'opérateur 103
2. Expérience sur la sensibilité de l'utilisateur à la raideur 105
2.1. Détermination du seuil différentiel 106
2.2. Détermination du seuil absolu 112
3. Conclusion 112

Chapitre 8 : Expérience sur l'anamorphose 115

1. But de l'expérience 116
2. Méthode expérimentale 117
2.1. Sujets 117
2.2. Appareillages 117
2.3. Les modèles de scènes virtuelles utilisées 117
3. Procédure 121
3.1. Conduite de l'expérience 121
3.2. Instructions au sujet 121
3.3. Nombre d'essais 122
4. Présentation des résultats 122
4.1. Variation de l'anamorphose 122
4.2. influence de la raideur de l'interaction 129
4.3. Variation de la représentation visuelle 133
4.4. interprétation des lois de Fitts et Meyer 137
5. Stratégie et remarques des sujets 141
6. Conclusion 142

Chapitre 9 : Habileté Motrice 143

1. Expérience sur l'habileté motrice 143
1.1. conduite de l'expérience 144
1.2. Analyse des résultats: 146
1.3. Conclusion 146
2. Autres scènes pour la mesure de l'habileté motrice 147

3. Autre modèle de scènes 148
3.1. Tâche d'assemblage 148
3.2. Tâche de télémanipulation 149
3.3. Véhicule articulé 150
3.4. Perception des objets géométriques 151
4. Conclusion 152

Chapitre 10 : Outils d'entraînement pour le geste chirurgical 153

1. Fonctionnalités du système 154
1.1. Mode d'entraînement direct 154
1.2. Mode d'entraînement supervisé 155
1.3. Mode d'entraînement avec assistance différée 155
2. Caractéristiques des dispositifs d'entrées et de sorties 155
2.1. Caractéristique du dispositif d'entrée à retour d'effort 155
2.2. Caractéristiques de l'écran graphique 156
3. Modèle physique de l'oeil 156
3.1. Caractérisation des objets intervenant dans la tâche 156
3.2. Modèle physique de l'oeil et du scalpel 157
3.3. Les fonctions d'interactions 159
3.4. Modèle géométrique de l'oeil 159
3.5. L'outil de manipulation à retour d'effort : le stick 3D 160
4. Différentes anamorphoses possibles 162
4.1. Anamorphose gestuelle 162
4.2. Anamorphose visuelle 162
4.3. Anamorphose geste/vison 163
5. Implémentation des différentes situations d'apprentissage 163
5.1. Mode d'entraînement direct 163
5.2. Mode d'entraînement supervisé 163
5.3. Mode d'entraînement avec assistance différée 164
6. Conclusion 165

Conclusion et Perspectives 167

Annexe A : Les dispositifs à retour d'effort 173

Annexe B : Taxonomie de J.S. Lipscomb et M.E. Pique 185

Annexe C : CORDIS-ANIMA 191

Bibliographie 201

Introduction Générale

Le travail que nous allons présenter dans cette thèse entre dans le cadre des recherches effectuées par l'équipe ICA du CLIPS (Laboratoire Communication Langagière et Interaction Personne - Système) en collaboration avec l'ACROE[1], dans les domaines de l'informatique appliquée à la création artistique (informatique musicale, image animée) et de l'interaction instrumentale.

La manière traditionnelle d'effectuer de l'animation ou de la synthèse sonore est basée sur le principe que chaque phénomène est caractérisé par un signal. Les sources acoustiques génèrent des signaux caractérisant l'évolution des paramètres sonores à travers le temps. L'animation consistait en la constitution d'une suite chronologique d'images dessinées ou photographiées. Cet assemblage, lu par un moteur à vitesse constante, reconstruisait un mouvement continu.

Plus récemment, une autre approche est apparue avec l'ordinateur, qui se distingue de la précédente en ce sens qu'elle ne se propose pas de reconstruire directement le phénomène produit (image en mouvement ou son) mais de produire ces phénomènes par construction d'une cause. Elle prend davantage pour sujet d'étude les objets producteurs d'images ou de sons que les images et les sons eux-mêmes.

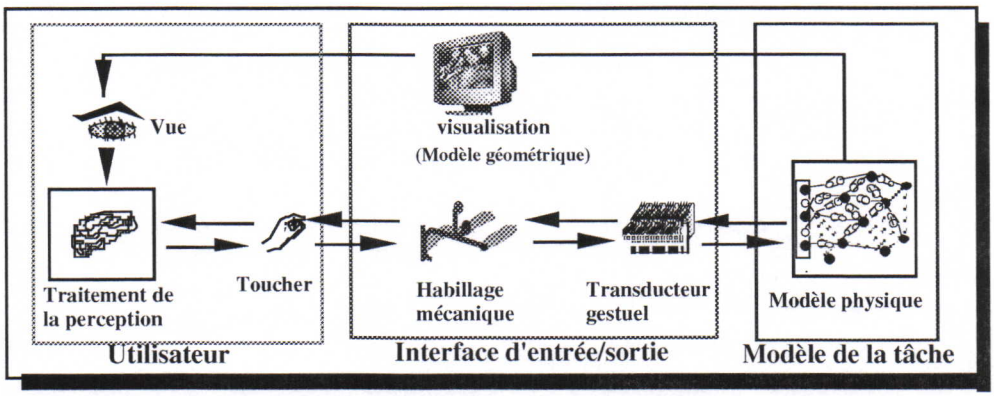


Figure 0.1 : *Interaction avec retour d'effort et retour visuel entre l'homme et la machine*

Lorsque nous voulons reproduire ces phénomènes par synthèse avec l'ordinateur, nous utilisons les effecteurs classiques que sont les écrans et les haut-parleurs, mais aussi des interfaces à retour d'effort permettant de générer les signaux support d'une perception proprio-tactilo-kinesthésique de ces phénomènes en réponse à une action captée. Dans ce cas, seule le deuxième type de méthode est envisageable, dans laquelle on tentera de donner un modèle physique de l'objet producteur des phénomènes sensoriels.

Un dispositif à retour d'effort est constitué de deux parties : une partie *transducteur* captant et

[1] Association pour la Création et la Recherche sur les Outils d'Expression. Centre de recherche du Ministère de la Culture.

restituant les phénomènes traités par la machine, et une partie mécanique donnant au dispositif la morphologie la mieux adaptée à la tâche, et que nous appelons *habillage*.

La réalisation d'un dispositif à retour d'effort performant suppose une certaine connaissance des gestes humains. Malheureusement, les études sur le geste ne sont pas encore aussi développées que celles sur la vision et l'audition. Avant que l'ingénierie ne s'intéresse à cette modalité sensori-motrice, l'étude du geste relevait essentiellement de la psychologie expérimentale [Gib62][Hat81]. Ces chercheurs ont étudié les pathologies touchant le geste, mis en évidence l'importance de celui-ci sur la connaissance de l'environnement, étudié les diverses sensations (sensation de pression, de température, de douleur, perception des vibrations, sensations des positions et des forces dans les muscles et les articulations...).

Ainsi, le canal gestuel étant, comme nous le verrons plus en détail par la suite, autant un moyen d'action que de perception, l'utilisation des dispositifs à retour d'effort dans les interfaces homme-machine pose des problèmes spécifiques ; certaines précautions devront être prises. À la différence des dispositifs d'entrée classiques (souris, claviers, ...) les interfaces à retour d'effort jouent en même temps le rôle de dispositifs d'entrée et de dispositifs de sortie.

Objectif de ce travail

Les caractéristiques électromécaniques et dynamiques des systèmes à retour d'effort ont fait l'objet de nombreux travaux dans l'équipe. Nous supposons ici leur connaissance suffisante. L'objectif de ce travail est alors d'étudier l'influence de la géométrie de l'habillage mécanique sur les performances de l'utilisateur dans l'exécution d'une tâche de manipulation et de déterminer un ou plusieurs critères de classement des transformations géométriques pouvant influencer ces performances. Nous appellerons *"anamorphoses gestuelles"* les transformations de la géométrie de l'espace de manipulation qui résultent de ces transformations géométriques.

Quelques questions se posent d'emblée :

- Peut-on installer n'importe quel habillage sur un transducteur ?

- Étant donnée une tâche, quelles sont les caractéristiques géométriques du transducteur qui assurent la meilleure situation d'interaction ?

- Quels paramètres géométriques permettent de caractériser une tâche de manipulation mettant en jeu la sensori-motricité gestuelle dans un environnement physique ?

Cette thèse traitera plus particulièrement de l'interaction gestuelle avec un environnement virtuel.

Organisation de la thèse

Elle comprend 10 chapitres organisés en 2 parties.

Partie A - L'INTERACTION GESTUELLE

Dans cette partie on s'intéressera plus particulièrement au côté 'machine' de l'interface homme-machine.

Chapitre 1

Ce chapitre décrira les différentes formes d'interaction entre l'homme et la machine. Nous traiterons les méthodes de classement des interfaces d'entrée et de sorties et nous présenterons une taxonomie pour le classement des interfaces à retour d'effort. Enfin, nous présenterons le contexte de nos recherches : l'interface de communication instrumentale (ICI).

Chapitre 2

On s'intéressera dans ce chapitre aux méthodes de mesure des perceptions de l'utilisateur humain. Nous nous appuierons sur les études faites en psychophysique.

Nous présenterons tout d'abord quelques principales méthodes d'analyse en psychophysique et les lois qu'elles ont permis d'énoncer. Puis nous présenterons les travaux réalisés dans le domaine de la psychologie expérimentale sur les perceptions gestuelles humaines ainsi qu'une méthode de caractérisation des tâches sensori-motrices. De cette étude, on déterminera une typologie de tâches de base que l'opérateur humain réalise dans son environnement physique.

Chapitre 3

Après avoir présenté les outils de mesure des performances de l'utilisateur humain, nous présenterons une typologie du geste, basée sur celle proposée par C. Cadoz [Cad94b]. Pour chaque fonctionnalité du geste, nous rappellerons les travaux précédemment réalisés.

Chapitre 4

Le but de ce chapitre est de déterminer une typologie de tâches sensori-motrices de base et d'étudier les caractéristiques gestuelles et matérielles de chacune de ces tâches. L'intérêt d'une telle étude est la caractérisation de la tâche dans son contexte comme étape préalable à leur modélisation physique.

Chapitre 5

Dans ce chapitre, on s'intéressera à la définition d'un critère pour la mesure des performances de l'utilisateur en interaction avec un environnement virtuel et les différentes situations pouvant influencer ses capacités d'interprétation.

Partie B - EXPÉRIMENTATIONS

Dans cette partie, nous analyserons le matériel utilisé et nous présenterons ses performances.

Ensuite, nous présenterons des expériences sur la perception dans des situations d'anamorphose. Enfin, nous présenterons un exemple d'étude de tâche : celle du geste chirurgical.

Chapitre 6

Dans ce chapitre, nous présenterons le dispositif à retour d'effort utilisé, ses performances et la manière de le calibrer. Ces précautions seront nécessaires pour situer nos mesures de performance par rapport aux possibilités du matériel.

Chapitre 7

Ce chapitre, quant à lui, traitera d'expériences préliminaires pour déterminer la manière la plus stable de tenir manuellement une touche du dispositif lorsqu'elle est connectée à un objet virtuel simple viscoélastique, et les performances de celui-ci dans la perception de la raideur de cet objet virtuel.

Chapitre 8

Dans ce chapitre, nous allons nous intéresser à la mesure des performances de l'opérateur dans certaines situations d'anamorphose, lors d'une tâche de positionnement. Trois situations d'anamorphose où l'action de l'utilisateur est différente de sa perception ont été traitées.

Chapitre 9

Dans ce chapitre, nous réaliserons une anamorphose particulière sur une tâche de saisie et de transport d'un objet virtuel déformable et nous étudions son influence sur les performances de l'utilisateur.

Chapitre 10

Dans ce chapitre, nous présenterons une amorce d'étude du geste chirurgical et nous esquissons une étude de différents cas d'anamorphoses pour ce type de tâche.

L'*Annexe A* présentera les caractéristiques de quelques dispositifs à retour d'effort ; l'*Annexe B*, la taxonomie de Lipscomb [Lip93] ; l'*Annexe C*, le langage de modélisation et simulation CORDIS-ANIMA développé au laboratoire et les modules de CORDIS-ANIMA supplémentaires, nommés MPVR (modules de modification point de vue relatif), que nous avons développés pour notre étude.

La *figure 0.2* suivante représente la structuration de ce document :

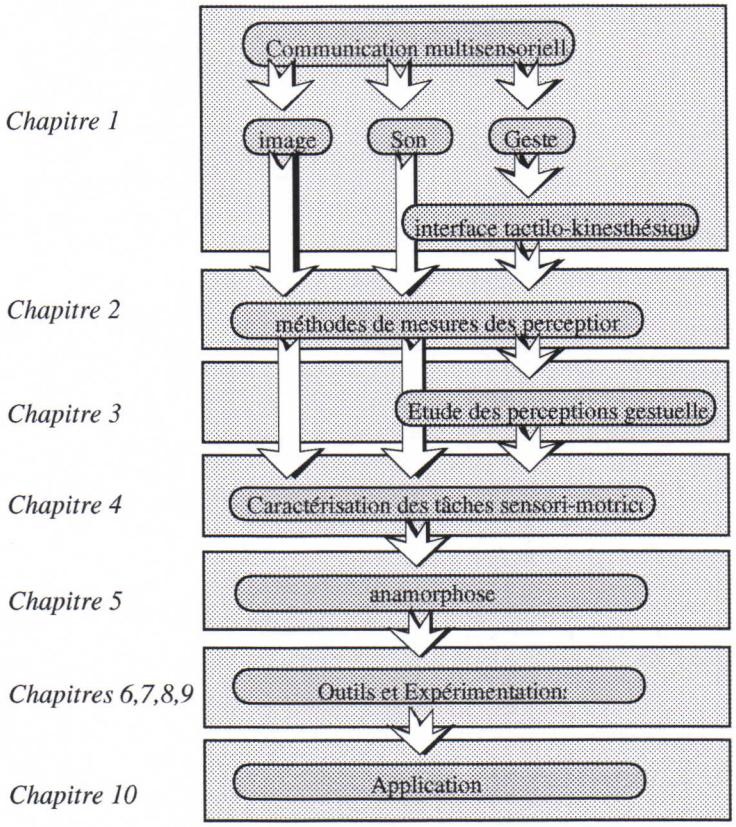


Figure 0.2 : *Organisation du document de thèse*

Partie A

L'Interaction Gestuelle

Chapitre 1

Les Interfaces Multisensorielles

L'évolution des technologies informatiques permet aujourd'hui d'envisager de nouveaux modes d'interactions de plus en plus complexes avec les machines par le biais d'interfaces de plus en plus performantes.

Au départ, les machines informatiques n'avaient pas la convivialité d'aujourd'hui. La tâche de l'utilisateur consistait à taper son code ligne par ligne sur le terminal comme sur une simple machine à écrire. Ensuite, avec l'avènement des circuits intégrés qui ont permis de réduire la taille des machines et augmenter leurs performances, d'autres types d'outils d'interaction également plus compacts et plus faciles d'utilisation ont été développés. Ces outils sont venus remplacer les premiers outils d'entrée qu'étaient les stylos optiques, les tablettes graphiques, etc.

Au début des années 70, l'intérêt pour la parole comme nouveau moyen de communication avec la machine a commencé à se manifester et plusieurs laboratoires se sont formés autour de ce thème de recherche [Cae92].

Au même moment, la synthèse d'image par ordinateur a évolué, et l'interaction textuelle a laissé place à l'interaction graphique. Par la suite ces graphiques sont devenus animés [Cha92], pour aboutir au réalisme des "nouvelles images" entièrement synthétiques et animées [Luc85] [Ter87] [Tha91].

Ces évolutions dans les différentes techniques informatiques ont fait naître la Communication Homme-Machine en tant que discipline à part entière. L'arrivée du Macintosh avec sa souris, ses icônes et ses fenêtres, suite aux travaux menés dans les laboratoires de XEROX, a complètement changé la manière d'interagir avec l'ordinateur : ces concepts nouveaux n'ont

pas tardé à convaincre un public réticent à l'utilisation de ces machines mystérieuses qu'étaient les ordinateurs.

La communication homme-machine telle qu'elle se présente aujourd'hui fait intervenir plusieurs domaines comme la parole, la linguistique, la psychologie de la perception et la psychologie cognitive, l'image de synthèse fixe et animée, les réseaux, etc. Ces différentes possibilités de communication ont donné lieu à des nouvelles voies de recherche connues sous le nom de "communication multimodale", "systèmes multimédia", "communication multisensorielle". Un domaine très en vogue ces dernières années est celui des "Réalités Virtuelles", dont le but est la réalisation d'une interaction la plus *naturelle* possible avec la machine. Par interaction naturelle, on désigne l'interaction permettant à l'utilisateur d'être en relation sensori-motrice avec l'environnement de la machine comme il l'est avec son environnement physique réel, par l'intermédiaire de ses gestes et de ses différentes perceptions : visuelle, auditive, tactile,.. etc. Lorsque plusieurs modalités sensorielles sont en jeu, C. Cadoz a introduit les termes de "situation multisensorielle" [Cad84a].

Pour que s'établisse une situation d'interaction multisensorielle, l'utilisateur doit pouvoir agir sur l'environnement virtuel[1] comme s'il agissait sur son environnement réel. Cela nécessite la mise en œuvre d'outils de simulation ayant des performances assez importantes au niveau du rendu visuel, sonore et gestuel, de la parole et de l'odorat. De plus tous les phénomènes sensibles correspondants doivent être produits suffisamment rapidement pour que l'utilisateur puisse corréler ses actions et les perceptions résultantes lors de la manipulation ou de l'observation de cet environnement virtuel.

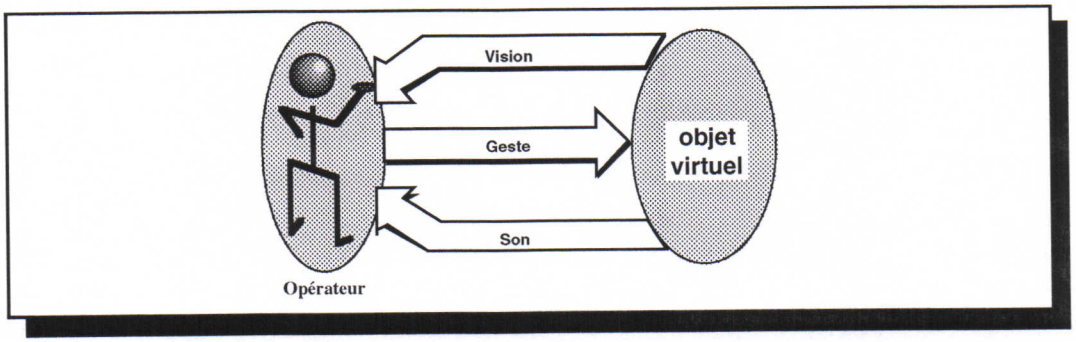


***Figure 1.1** : Interaction avec un objet virtuel*

Pour l'heure, la communication multisensorielle utilise principalement trois canaux sensori-moteurs : le canal visuel, le canal acoustique et le canal gestuel. L'odorat, nécessitant la réalisation de transducteurs physico-chimiques, n'est pour l'instant pas considéré.

La situation la plus fréquente aujourd'hui est celle dans laquelle les deux premiers canaux sont utilisés comme canaux de perception et le dernier comme canal d'action *(figure 1.1)*.

Cependant, pour agir sur des objets dans le monde réel nous utilisons bien sûr la vision et l'ouïe comme canaux de réception d'informations, mais le geste intervient non seulement comme canal d'action mais également comme canal de réception d'informations proprio-tactilo-kinesthésiques *(figure 1.2)*. Pour avoir une telle relation sensori-motrice

[1]Par virtuel nous désignons tout ce qui est représenté par la machine.

multisensorielle avec un environnement représenté par ordinateur, nous devons recourir à des effecteurs visuels, acoustiques, mais également proprio-tactilo-kinesthésiques. Nous devons recourir également à des capteurs, placés entre l'utilisateur et le système de simulation pour récupérer les actions de celui-ci et les transférer dans l'environnement virtuel (capteur de position, de force, de vitesse, d'accélération). Nous parlerons ici "d'action gestuelle " pour la distinguer de l'émission verbale. De même, pour des commodités de lecture et d'écriture, il nous arrivera de remplacer le terme "tactilo-proprio-kinesthésique" par le mot "gestuel". Nous parlerons donc d'action et de perception gestuelles.

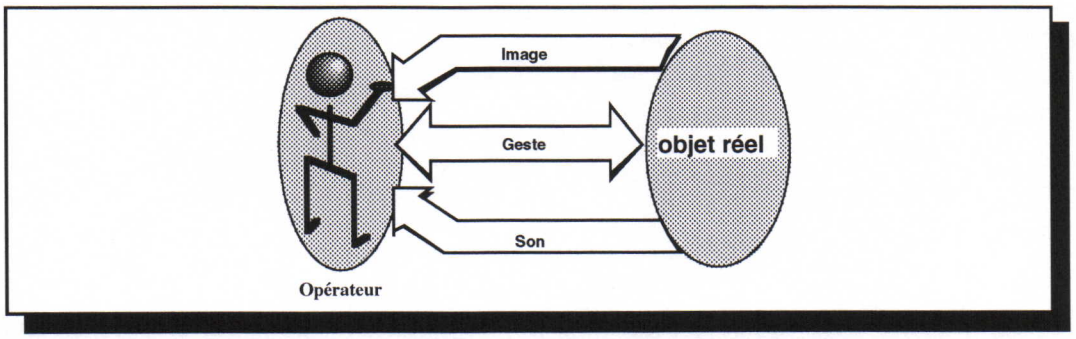


Figure 1.2 : *Interaction avec un objet réel*

Dans la section qui suit nous allons présenter les différentes approches de la communication homme-machine multisensorielle. Nous présenterons les systèmes multimodaux, les systèmes multimédia et les réalités virtuelles. L'objectif de ces différentes techniques est toujours le même : faciliter la tâche de l'opérateur humain (augmenter ses performances) et éviter les erreurs d'interprétation que peut introduire la représentation machine. Ensuite nous présenterons l'approche de notre laboratoire concrétisée par la réalisation de l'Interface de Communication Instrumentale.

1. Les systèmes Multimédias et Multimodaux

Afin de mieux situer notre étude, nous avons estimé pertinent de clarifier les notions de multimédia et multimodal, qui apparaissent souvent confondues.

Multimédia réfère à l'utilisation de *médias* différents et multimodal à l'utilisation de plusieurs *modalités*. Par média il faut entendre les supports des informations transmises à l'utilisateur. La modalité se rapporte, quant à elle, au processus de perception et de représentation par l'opérateur humain. La notion de "multimédia" est donc relative au matériel, et la notion de "multimodal" à l'opérateur humain. Pour W. Buxton [Bux94], les systèmes multimédia désignent le support ou la technologie plutôt que l'application ou l'utilisateur.

Les systèmes informatiques multimédia ont pour objectif d'acquérir, de restituer, de mémoriser et d'organiser des informations numériques ou analogiques provenant de différents médias. Ces systèmes multimédia n'ont a priori aucune connaissance syntaxique ou sémantique des données qu'ils manipulent, et n'ont pas de capacités intrinsèques pour dialoguer avec l'opérateur.

Les systèmes multimédia tels que nous les voyons aujourd'hui dans le domaine grand public sont constitués d'un système de rendu sonore performant, permettant d'écouter et d'enregistrer des sons et d'un système de visualisation d'images, animées ou non. La relation entre les deux médias se situe également à un niveau purement technique, tel que par exemple l'ajout de processus de post-synchronisation entre l'image et le son. Dès que l'on s'intéresse un tant soit peu au contenu de l'information portée par ces médias, soit dans un but de meilleure présentation de celle-ci à un utilisateur humain, soit parce qu'ils sont un composant d'une situation interactive de questionnement manuel ou vocal par l'utilisateur, on passe insensiblement à des études intégrant ce dernier. La notion de communication multimodale apparaît alors. On pourrait alors parler de communication "multimodale" via (ou avec) des systèmes "multimédia".

Dans l'interaction multimodale l'utilisateur interagit à l'aide de plus d'un *canal sensoriel*.. Par canal sensoriel ou sens, on désigne un organe de perception humain. Usuellement, les moyens d'interaction avec la machine sont le clavier, la souris et l'écran. Autrement dit, la communication est multimodale mais elle se restreint à la modalité visuelle en sortie et la modalité gestuelle en entrée. Le fait même de l'apparition du mot "communication multimodale" traduit l'idée que l'on souhaite aller plus loin dans l'introduction de canaux de communication. On peut noter alors l'introduction de la parole [Bar92], puis du son et enfin de la perception gestuelle. Les études sur la communication multimodale abordent alors les différentes combinaisons possibles entre ces différentes modalités lors de l'exécution d'une tâche. Elles peuvent êtres utilisées en même temps ou combinées deux à deux. Par exemple, nous pouvons agir par la parole et percevoir par la vue, ou agir par le geste et la parole mais percevoir par la vue. Le choix des modalités et de leur combinaison dépendra de l'application et des performances exigées par l'utilisateur.

Buxton [Bux94] établit une différence entre le terme "multisensoriel" qu'il utilise pour désigner l'utilisation de plusieurs modalités sensorielles (canaux sensoriels), et le terme multi-canal pour désigner l'utilisation de plusieurs canaux, de mêmes modalités ou non.

Frohlich [Fro91] utilise la notion de *mode*[2] pour distinguer entre les différentes possibilités de réaliser une même tâche (par exemple, il y a deux manières d'accéder à un répertoire, soit en tapant textuellement le nom de ce répertoire soit cliquant sur le répertoire à l'aide de la souris). Il utilise aussi la notion de *canal*[3] pour désigner la nature de l'information captée et transmise de part et d'autre, entre l'utilisateur et la machine. Chaque canal possède ses capteurs et ses effecteurs. Pour Frohlich, un média correspond au système de représentation utilisé pour l'échange de l'information, et non au support matériel. Pour Frohlich encore, le texte et le graphique sont deux médias différents bien qu'ils utilisent le même support matériel.

Nigay [Nig94] a réalisé un classement des différents types de communication entre l'opérateur humain et l'ordinateur. Nigay utilise le terme multisensoriel pour désigner les systèmes où le nombre de canaux d'entrée et le nombre de canaux de sortie est supérieur ou égal à deux. Le système est multimédia en entrée si le nombre de canaux d'entrée est

[2]Frohlich distingue deux modes, le mode linguistique et le mode action.
[3]Il définit un canal comme une interface à travers laquelle il y a transformation de l'énergie.

supérieur à 1, multimédia en sortie si le nombre de canaux de sortie est supérieur à 1 *(figure 1.3)*.

	Entrée < 2	Entrée ≥ 2
Sortie <2	ni multimédia ni multimodal	multimedia en sortie multimodal en entrée
Sortie ≥ 2	multimedia en entrée multimodal en sortie	multisensoriel

Figure 1.3 : *Distinction entre multisensoriel, multimodal et multimédia d'après [Nig94]*

Pour Barés [Bar92], un système multimodal doit analyser, comprendre et répondre, en respectant les modalités de communication. Pour la réalisation d'une communication multimodale le système doit être capable d'effectuer certaines opérations :

- Intégrer des informations qualitativement différentes pour parvenir à un niveau d'abstraction suffisant pour permettre un dialogue.
- Sélectionner une ou plusieurs modalités en sorties, générer des informations nécessaires sur ces modalités et modifier les connaissances du système.
- Répartir les messages sur différentes modalités.
- Tenir compte des aspects temporels pour séquencer et synchroniser le dialogue sur différentes modalités sachant que chaque modalité a un temps d'exécution propre.
- Fonctionner en temps réel pour avoir un dialogue le plus naturel possible entre l'opérateur et la machine.

Pour Cadoz [Cad84a], le canal garde son sens premier de canal sensori-moteur : la vue (canal visuel), l'audition (canal auditif), le geste (action et perception proprio-tactilo-kinesthésique), indépendamment de la nature de l'information véhiculée sur ce canal dans une situation communicationnelle (nature physique ou nature symbolique). Ceci ne limite en rien le fait que chaque canal sensori-moteur peut nécessiter l'usage de systèmes matériels multidimensionnels pour véhiculer l'information qu'il produit ou qu'il reçoit. Ainsi, l'usage du canal sensori-moteur gestuel dans une situation d'interaction entre un homme et un ordinateur suppose la mise en œuvre de dispositifs capteurs et effecteurs multidimensionnels et structurés. Apparaît alors la notion de canal de transmission, au sens de la théorie de l'information, désignant le moyen matériel pour véhiculer une information. Celui-ci se définit à partir des propriétés objectives des signaux à transmettre. Ces propriétés objectives sont celles de chacun des signaux et de leur corrélation [Raz86][Ram91][Luc85]. Ainsi, un geste effectué sur une souris générera un signal gestuel bi-dimensionnel. Le canal de transmission sera bi-dimensionnel. Mais un geste effectué sur deux curseurs nécessitera deux canaux de transmission mono-dimensionnels.

Résumé

Dans la présente section, nous avons défini des termes utilisés dans la communication de l'homme avec la machine. Nous avons vu que les différents textes invoquent le multimédia

en référence au support de l'information et le multimodal en référence aux organes humains de perception.

Dans ce qui suit nous allons définir les termes utilisés dans notre étude :

Canal sensoriel : Par canal sensoriel nous désignons la faculté avec laquelle l'organisme humain est renseigné sur son environnement extérieur (dans notre étude on s'intéressera particulièrement à la vue, l'audition, la sensation proprio-tactilo-kinesthésique). Nous utilisons le terme canal visuel pour désigner la perception par la vision, canal acoustique pour désigner la perception auditive.

Le canal gestuel est un *canal sensori-moteur* (sensoriel : perception tactilo-kinesthésique ; moteur : action de la main).

Communication multisensorielle : par communication mutisensorielle on désignera une situation de communication utilisant la vue, l'audition et la sensation proprio-ttactilo-kinesthésique pour la perception et le geste manuel pour modifier l'état du système. Il en est de même pour les termes de situation multisensorielle et d'interaction multisensorielle.

2. Les réalités virtuelles

Dans cette section nous donnerons les fondements du concept de "réalités virtuelles" [Bou94]. Plusieurs ouvrages traitent du domaine, tels que "les Réalités Virtuelles" de C.Cadoz [Cad94a], "La Réalité Virtuelle" de G.Burdea et P.Coiffet [Bur93], "les Réalités Virtuelles" de H.Rheingold [Rhe91]. Certains se focalisent sur les aspects techniques [Bur93], d'autres sur les aspects philosophiques ou artistiques [Rhe91].

La Réalité Virtuelle est une approche différente de la communication multimédia ou multimodale en communication Homme-Machine. Le monde réel est remplacé par un monde virtuel. L'utilisateur se trouve dans ce monde virtuel, si possible exclusivement. On parle d'immersion. Les interactions de l'opérateur avec cet environnement se font à travers des casques de visions stéréoscopiques, des gants de données, des capteurs de positions 3D, etc. Pour que la substitution entre monde réel et monde virtuel puisse avoir lieu le plus totalement possible, on cherche à ce que ce monde virtuel soit une copie la plus fidèle possible du monde réel. On évalue l'efficacité de cette substitution par le concept de degré de présence ("degree of presence") [Sch95]. Cadoz [Cad94] préfère quand à lui le terme de "degré de conviction" qui laisse plus clairement entendre que le monde virtuel est un mode recréé qui aura à convaincre l'utilisateur qu'il est le monde réel. Cela ne présuppose donc rien quand à l'identité entre les deux mondes.

La définition la plus simple et la plus efficace que j'ai trouvée des réalités virtuelles est celle donnée selon une approche purement technique par Burdea [Bur93]:

"Un système de Réalité Virtuelle est une interface qui implique de la simulation en temps réel et des interactions via de multiples canaux sensoriels. Ces canaux sensoriels sont ceux de l'homme : vision, audition, toucher, odorat, goût."

Elle insiste sur le principe de multisensorialité dans un contexte artificiel. Elle ne présuppose cependant rien en ce qui concerne le principe d'immersion énoncé ci-dessus, qui est pourtant historiquement constitutif de l'émergence du terme "réalités virtuelles".

Le premier système utilisant ce principe de multisensorialité a été le "Sensorama" développé par M.Heilig en 1961, ce système intégrait un dispositif de déroulement de films, une impression de mouvement réalisée par une chaise à vibration et une impression olfactive avec un diffuseur d'odeurs par ventilateurs.

D'après [Ros90], un système de réalité virtuelle est caractérisé par :

- La synthèse d'image réaliste tridimensionnelle (construction de modèles, éclairage, projection 3D). Ce point insiste sur le réalisme visuel des images.
- La modélisation du comportement physique d'objets à travers la modélisation de la dynamique. Ce point insiste sur le réalisme des mouvements.
- L'interaction tactile avec le monde virtuel. Il restreint le réalisme corporel à la sensation de contact.
- La possibilité pour différents utilisateurs connectés ensemble sur réseau de partager la même réalité virtuelle. Ce dernier point est l'un des plus importants. Il insiste sur l'idée qu'une réalité n'est telle que lorsqu'elle est partagée, c'est à dire que plusieurs personnes sont amenées à décréter communément son existence.

3. Les interfaces d'Entrée

Dans la section précédente nous avons présenté les différentes types de communication qui peuvent s'établir entre l'homme et la machine. Dans cette section, nous parlerons des outils nécessaires pour établir une communication entre l'utilisateur et l'ordinateur. L'ordinateur manipule des signaux électriques (données abstraites) et l'utilisateur des phénomènes susceptibles d'être perçus et produits par ses organes (yeux, oreilles, mains, etc.). Donc pour que la communication entre l'ordinateur et l'utilisateur puisse s'établir, il faut passer d'une représentation numérique à une représentation perceptible par l'utilisateur. Pour la réalisation de cette transformation, nous avons besoin d'un ensemble de capteurs (micro, caméra, clavier, souris, ...) et d'effecteurs (écrans, casques, haut-parleurs, ...). Si l'on appelle "signal" ce qui est produit par un capteur ou ce que reçoit un effecteur, le système considéré n'est pas uniquement composé de l'ordinateur et de l'utilisateur mais aussi des capteurs et des effecteurs effectuant la transformation des actions humaines en signaux numériques et des signaux numériques en informations perceptibles.

La communication entre l'homme et la machine se fait suivant un cycle bien déterminé : capture des informations par la machine, traitement de ces informations, et envoi des informations traitées à travers les effecteurs vers l'utilisateur. Le même cycle se fait du côté de l'utilisateur humain *(figure 1.4)*.

A partir de cette approche générale des interfaces d'entrée et de sortie, certains travaux se sont intéressés à caractériser les interfaces d'entrée et de sortie de manière plus approfondie. La caractérisation des interfaces d'entrée a fait l'objet de plusieurs taxonomies [Bux83][Mac90][Fro91][Nig94]. La plus populaire est celle développée par Buxton [Bux83] qui représentait un point de départ pour celles de Mackinlay [Mac90] et Lipscomb [Lib95].

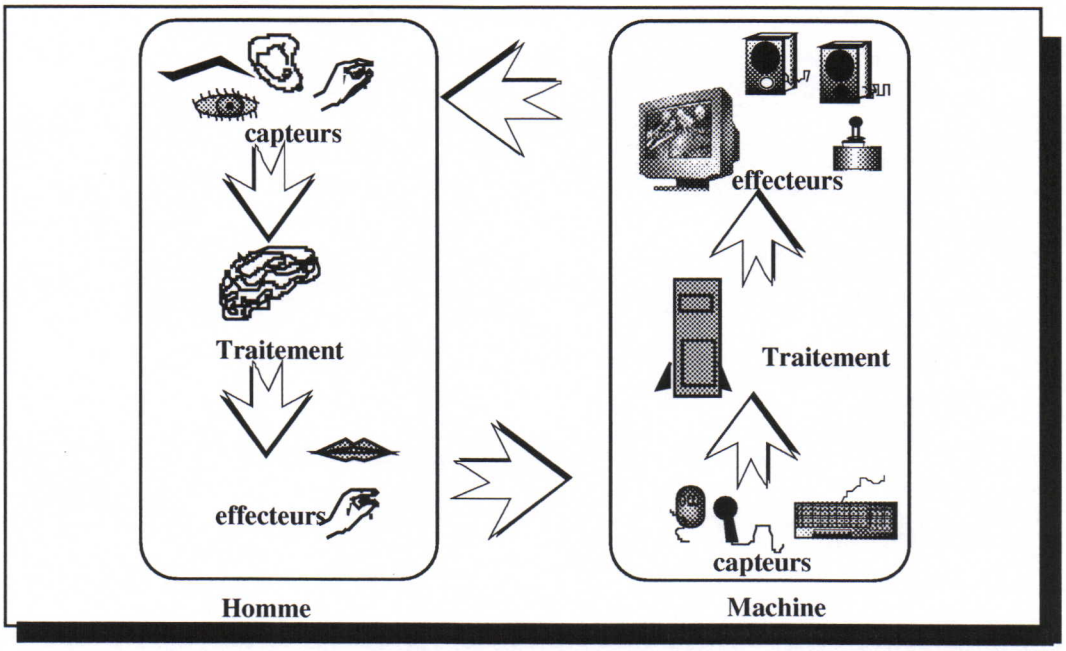


***Figure 1.4** : Les différentes phases de la circulation de l'information entre l'homme et la machine*

3.1. Taxonomie des interfaces d'entrée selon Buxton

Buxton [Bux83] a proposé un hypercube *(figure 1.5)* pour caractériser les dispositifs physiques d'entrées à l'aide des trois caractéristiques suivantes :

- les phénomènes captés par le dispositif **P** (position, déplacement, pression),
- le nombre de degrés de liberté (DDL) du système $\mathbf{N_{DDL}}$
- et le type de manipulation : la manipulation est dite directe lorsque l'opérateur manipule directement le transducteur (comme avec les tablettes tactiles). Le système se décrit par $<(P, N_{DDL})>$. La manipulation est dite indirecte, lorsqu'il y a un intermédiaire mécanique entre les deux (par exemple, manipuler la tablette tactile à travers un stylet **D**). Le système se décrit par $<(P, N_{DDL}), D>$.

Dans le tableau de Buxton [Bux83], nous trouvons des cases contenant les dispositifs existants et d'autres cases vides pour les dispositifs qui pourront être réalisés.

Le modèle de Buxton est intéressant dans le sens où il prend en compte les caractéristiques principales de l'interface gestuelle. Mais la limite la plus fondamentale de ce modèle est qu'il ne considère que les interfaces continues (souris, potentiomètres, etc) et ne prend pas en compte les interfaces discrètes telles que le clavier. De plus il semble que le modèle de Buxton, bien adapté aux dispositifs de manipulation gestuelle existants, ne soit pas

généralisable à d'autres dispositifs gestuels, tels que les dispositifs pouvant combiner des capteurs de forces et des capteurs de positions [Bri94].

Propriété captée		Nombre de dimensions 1		2				3	
		rotation	translation	palet	stylo doigt horiz.	stylo doigt verti.	position fixe	position fixe avec torsion	
position		Potentiomètre à rotation	Potentiomètre linéaire	Tablette et palet	Tablette et stylet	stylo optique	joystick isotronique	joystick 3D	M
					Tablette tactile	Ecran tactile			T
déplacement		potentiomètre à rotation sans fin	chenille	Souris			joystick ou trakball a ressort de rappel	Trackball 3D	M
			Ferinstat				joypad		T
Pression		capteur de couple					joystick isométrique		T

Figure 1.5 : *Taxonomie des dispositifs d'entrée [Bux83]*

3.2. Taxonomie des interfaces d'entrée selon Mackinley et coll.

Un autre modèle décrit par Mackinlay et al [Mac90] est une extension du modèle de Buxton. Pour Mackinlay un dispositif est caractérisé par six paramètres, certains étant bien structurés, d'autres l'étant moins (ils ne représentent que des caractéristiques assez générales) :

- *La propriété physique captée* par l'interface d'entrée : cette propriété ne peut être qu'une force ou une position pour un déplacement linéaire, un couple ou un angle pour un déplacement circulaire. Chaque valeur captée est absolue si elle correspond à la position physique captée (par exemple la position captée par une tablette tactile correspond a celle utilisée par l'application). Une valeur est relative s'il n'y a pas correspondance exacte entre la position du dispositif physique et de la valeur de sortie de celui-ci. Par exemple la souris est un dispositif à position relative puisque la position du curseur que nous observons peut correspondre à plusieurs localisations de la souris dans l'espace physique (en soulevant la souris nous pouvons la déplacer sans déplacer le curseur à l'écran).

- *Entrée* : l'intervalle défini pour les valeurs d'entrée de la propriété physique captée.

- *Sortie* : l'intervalle pour les valeurs de sortie du dispositif physique vers l'application.

- *La fonction de résolution* : cette fonction définit la relation entre l'intervalle d'entrée du dispositif et l'intervalle de sortie de celui-ci (par exemple, pour le dispositif décrit au *Chapitre 6*, l'utilisateur effectue un déplacement effectif compris entre -1,5 et 1,5 cm, et les valeurs en sortie sont comprises entre -32000 et 32000).

- *L'état présent* du dispositif d'entrée, (la valeur de sortie initiale du dispositif d'entrée).

- Une primitive désignant *le fonctionnement* du dispositif physique. Cette primitive décrit les relations entre l'entrée et la sortie en fonction de l'état du dispositif.

De ce qui précède nous pouvons comprendre que ces paramètres sont utilisés pour décrire des dispositifs élémentaires, ce qui a poussé Mackinlay et coll. à définir des opérateurs de composition lorsqu'il s'agit de dispositifs plus complexes :

- La fusion (*merge*) : représente le produit cartésien de deux ou plusieurs grandeurs captées en entrée par les dispositifs. Par exemple, la position de la souris est le produit cartésien de sa position sur l'axe des abscisses et l'axe des ordonnées.
- La connexion : il s'agit de la composition en cascade de dispositifs de telle sorte que la sortie de l'un soit l'entrée de l'autre.
- La disposition (*layout*): relative à l'espace. Par exemple, les boutons de la souris sont spatialement liés au dispositif de positionnement.

A coté de ces opérateurs de composition, nous trouvons un mécanisme d'encapsulation. L'encapsulation successive nous permet de passer du dispositif physique à sa représentation virtuelle. L'apport le plus intéressant de la taxonomie de Mackinlay par rapport à celle de Buxton est la notion d'opérateur de composition permettant le couplage des dispositifs simples pour obtenir des dispositifs plus complexes. Par exemple, deux potentiomètres rectilignes séparés physiquement peuvent fusionner virtuellement pour déplacer un curseur sur l'axe des ordonnées et des abscisses à l'écran. La possibilité offerte par cette taxonomie est la capacité de caractériser les propriétés spatiales du dispositif. Mais on reproche deux contraintes à cette taxonomie : la première est qu'elle ne considère pas l'interface gestuelle en tant que dispositif de sortie; la deuxième est qu'elle ne prend pas en compte les caractéristiques temporelles de l'interface, qui peuvent avoir une importance dans le cas de la communication en temps réel.

3.3. Taxonomie des interfaces d'entrées selon Lipscomb

Lipscomb et al [Lip93] ont présenté une taxonomie inspirée de celle de Buxton [Bux83] dans laquelle ils ont ajouté d'autres niveaux. L'intérêt de leur taxonomie est qu'elle prend en compte davantage de variables significatives dans la caractérisation des interfaces que les taxonomies de Buxton et Mackinlay. Dans le graphe de Lipscomb, les noeuds désignent les caractéristiques du dispositif et les traits les liens entre chaque niveau. L'avantage d'une telle classification est la facilité de comparaison des dispositifs étape par étape et la visibilité directe des contraintes imposées par un choix à un niveau quelconque du graphe.

Ces primitives sont structurées en deux graphes : le premier *(figure 1.6)* caractérise les dispositifs fixes dans l'environnement de l'utilisateur, que nous appellerons : les 'dispositifs fixes'[4] (la souris est un de ces dispositifs), le deuxième graphe *(figure 1.7)* représente les dispositifs dont la position est liée à l'opérateur, nous les appellerons : les 'dispositifs mobiles'[5] (les gants de données sont un exemple de tels dispositifs). Ces graphes

[4]Table Top devices pour Lipscomb
[5]Elevated Devices pour Lipscomb

caractérisent les dispositifs par leurs propriétés physiques, ce qui permet la présentation des différentes alternatives au moment du choix d'un dispositif.

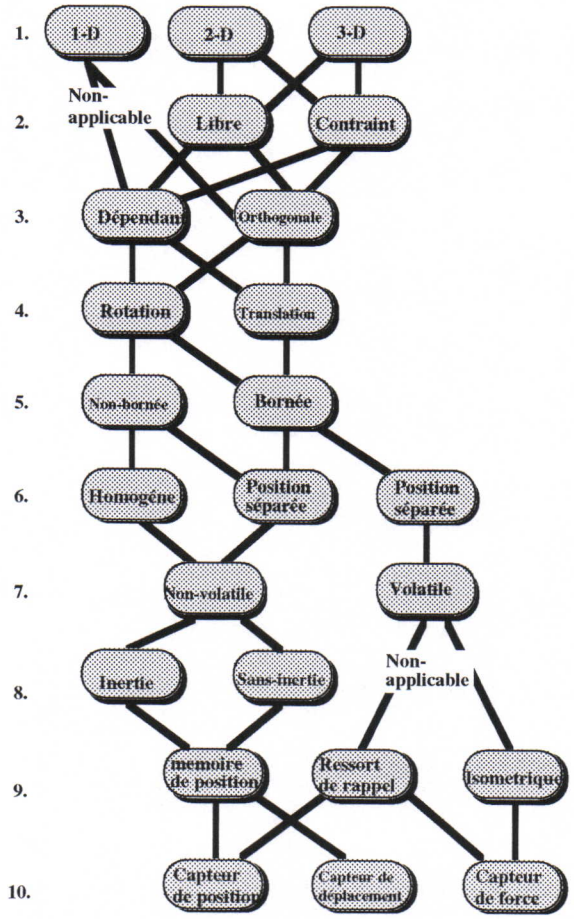


Figure 1.6 : *Graphe des relations entre les caractéristiques des dispositifs physiques à position fixe [Lip93].*

Nous avons trouvé intéressant de reprendre la taxonomie de Lipscomb en l'illustrant d'exemples à chaque niveau pour faciliter sa compréhension *(cf. Annexe B)*. Dans cette taxonomie nous avons dix niveaux de primitives, classées en deux catégories : les primitives propres au dispositif total et celles propres à un seul degré de liberté (DDL) du dispositif.

La taxonomie de Lipscomb est assez complète. Elle considère plusieurs caractéristiques qui peuvent justifier le choix d'un dispositif physique, et les conséquences d'un choix par rapport à un autre. Cette taxonomie permet de simuler les tâches de manipulations gestuelles avant même que l'application soit achevée et ainsi choisir le dispositif physique approprié. Lipscomb a détaillé les caractéristiques introduites par Mackinlay. Par exemple nous pouvons remarquer que les niveaux 6, 8 et 9 correspondent à la primitive 'fonctionnement' du dispositif physique. Mais comme les taxonomies de Buxton et Mackinlay, elle ne considère pas le cas du dispositif jouant simultanément le rôle de dispositif d'entrée et de sortie.

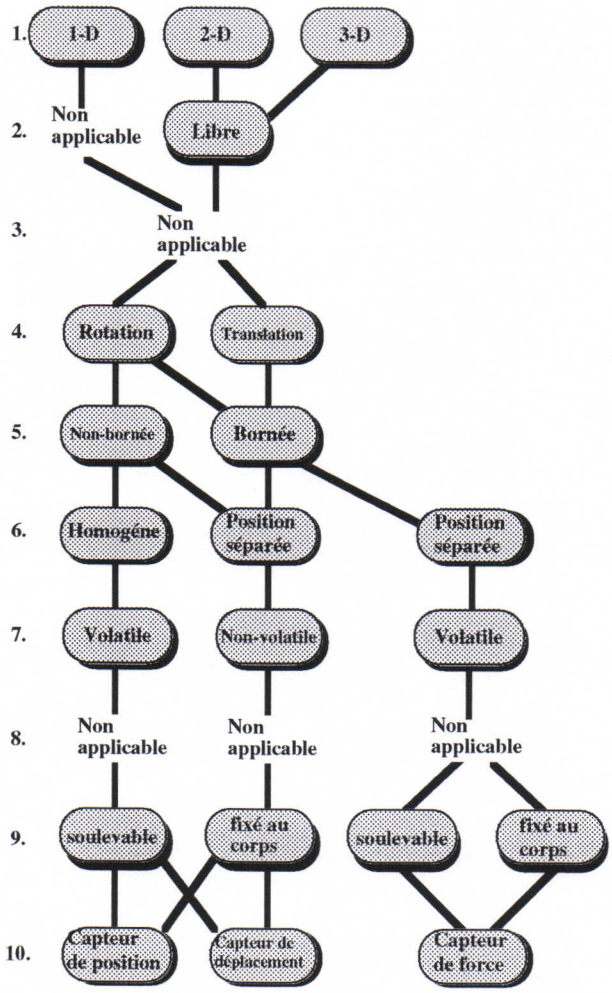


Figure 1.7 *: Graphe des relations entre les caractéristiques des dispositifs physiques mobiles [Lip93]*

Conclusion

Certaines caractéristiques permettant de différencier des dispositifs dans la taxonomie de Lipscomb peuvent être compensées par l'application. Par exemple, un dispositif volatile peut devenir non-volatile en mémorisant sa dernière position avant qu'il ne revienne à son état initial. Il serait donc intéressant de distinguer ce qui dans le dispositif physique est non-compensable par l'application de ce qui est compensable. Ceci voudra donc dire qu'un dispositif à priori volatile peut être en même temps volatile et non-volatile.

Le modèle de Buxton, et surtout celui de Mackinlay décrivent les paramètres caractérisant l'interface d'entrée exploitable par l'application. Leurs modèles sont adaptés à la caractérisation de nouvelles interfaces. Par contre, la taxonomie de Lipscomb est adaptée au choix des dispositifs par la comparaison de leurs caractéristiques morphologiques et dynamiques, la plupart de leurs niveaux ne sont pas exploitables par l'application.

Cependant, toutes ces taxonomies ne considèrent pas le cas où le dispositif peut jouer le rôle de dispositif de sortie en plus du rôle de dispositif d'entrée, et où ses caractéristiques à l'entrée peuvent influencer ses propriétés à la sortie. Par exemple, les transformations géométriques qu'effectuent le dispositif à l'entrée doivent être considérées à la sortie (une

transformation de position en entrée doit être prise en compte pour le calcul de la force à la sortie).

De plus, l'action gestuelle d'un opérateur peut être caractérisée par d'autres paramètres tels que la vitesse et l'accélération, et non pas uniquement par la position et la pression (force ou couple). Nous pouvons aussi avoir besoin de traiter eu même temps plusieurs paramètres à l'entrée.

L'étude des interfaces de sortie n'a pas encore suscité le même intérêt que les interfaces d'entrée, et les études dans ce domaine sont rares [Nig94][Fro91]. Les interfaces de sortie considérées généralement sont : les sorties visuelles (écrans) et les sorties acoustiques (haut-parleurs). Aujourd'hui, nous trouvons des interfaces de sorties gestuelles, qui sont très peu considérées dans la conception des applications informatiques. Dans sa taxonomie, Frohlich a caractérisé l'interface de sortie suivant les fonctionnalités qu'elle permet et le sens utilisé. Mais il n'a pas considéré les caractéristiques physiques de l'interface permettant la comparaison des interfaces stimulant le même sens.

4. Taxonomie des interfaces à retour-d'effort

Dans les sections précédentes, nous avons étudié les différentes classifications des dispositifs physiques d'entrée. La classification de Buxton utilise un tableau de trois paramètres pour caractériser les interfaces à entrée continue. L'insuffisance de cette caractérisation a justifié la réalisation d'autres taxonomies plus complètes [Mac90][Bux90][Lip93]. La taxonomie de Mackinlay est assez générale et nous nous en sommes inspirés pour la réalisation de la nôtre. La taxonomie de Lipscomb est assez complète, mais restreinte aux dispositifs d'entrée existants. Elle est intéressante par le fait qu'elle peut aider à modéliser l'instrument virtuel[6] en présence de retour d'effort.

Deux conditions ont motivé notre taxonomie : la première est qu'elle soit adaptée aux interfaces à retour proprio-tactilo-kinesthésique et donc qu'elle intègre le fait que le dispositif joue en même temps le rôle d'entrée et de sortie ; la deuxième est qu'elle soit assez générale pour être utilisée avec n'importe quel dispositif et permette d'aider à le concevoir s'il n'existe pas.

4.1. Les paramètres caractérisant notre Taxonomie

Nous proposons une taxonomie sur 12 niveaux permettant de caractériser un dispositif à retour d'effort, et de le choisir en fonction de l'application.

Les 10 premiers niveaux *(figure 1.8)* ne représentent que la caractéristique pour un degré de liberté :

- Le premier niveau représente la *grandeur physique captée*. Cette grandeur peut être : une force (couple), une position (angle), une vitesse ou un déplacement. Dans notre

6par instrument virtuel on désigne l'instrument simulé, et donnant un comportement particulier au dispositif réel en presence de retour d'effort.

table, nous avons défini quatre grandeurs physiques captées. Cependant, rien ne nous empêche d'intégrer d'autres grandeurs telles que l'accélération. Certaines de ces valeurs peuvent être nécessaires au niveau du dispositif uniquement (niveau bas) pour les asservissements et la compensation de la mécanique [Nou95] et d'autres pour l'application. Par exemple, nous pouvons utiliser un capteur de force en plus du capteur de position pour compenser des effets liés à la mécanique du dispositif sans l'utiliser nécessairement au niveau de l'application.

Paramètres	Variables
Paramètre physique capté par le dispositif	Force(F_e, C_e), Position(P_e, A_e), Vitesse(V_e), Déplacement (D_e)
Nature du déplacement	Rotation (R), Translation (T)
Plage de variation d'entrée des grandeurs captées	Continu [Iec_1->Iec_2], Discret [Iec_1,Iec_2,Iec_3, ..., Iec_n]
Plage de variation de sortie des grandeurs captées vers l'application	Continu [Isc_1->Isc_2], Discret [Isc_1,Isc_2,Isc_3, ..., Isc_n]
Référentiel	Absolu (RA), Relatif (RR)
Précision en entrée	Pr_e
Plage de variation d'entrée de l'application vers le dispositif	Continu [Iea_1->Iea_2], Discret [Iea_1,Iea_2,Iea_3, ..., Iea_n]
Plage de variation de sortie du dispositif vers l'utilisateur	Continu [Isu_1->Isu_2], Discret [Isu_1,Isu_2,Isu_3, ..., Isu_n]
Grandeur physique de sortie du dispositif	Position (P_s), Force (F_s)
Précision en sortie	Pr_s
Degrés de liberté	DDL
Bande passante du dispositif	Bp

Figure 1.8 : *Table de caractérisation des interfaces à retour d'effort*

- La grandeur captée peut être une rotation ou une translation ; ceci dépend de la nature du capteur utilisé.
- *La plage de variation à l'entrée des grandeurs captées* nous renseigne sur l'environnement de travail du dispositif. Cet intervalle est considéré comme continu si pour passer d'une position à une autre nous avons des positions intermédiaires. Un potentiomètre est un dispositif continu, un interrupteur est un dispositif discret (un dispositif à retour d'effort est toujours considéré comme continu).
- *La plage de variation en sortie des grandeurs captées* correspond aux valeurs réellement envoyées par le dispositif à l'application. Par exemple, un déplacement d'un centimètre effectué par l'utilisateur dans l'environnement de travail correspond à une valeur de sortie du capteur qui n'est pas de même grandeur physique.
- La relation entre les plages de variation des grandeurs d'entrée et de sortie du dispositif nous permet de connaître *la précision* de celui-ci. C'est un critère dans le choix de l'interface.

- Nous avons aussi défini la notion de *référentiel* pour déterminer si les grandeurs mesurées sont relatives ou absolues. On parlera de mesure absolue lorsque la valeur captée correspond à une valeur unique dans l'application. On parlera de valeurs relatives lorsque la valeur captée correspond à des valeurs différentes dans l'application. Par exemple, si nous considérons le gant de donnée [Pat90], il possède des capteurs sur les doigts pour mesurer l'angle des articulations mais aussi un capteur pour situer la position de la main dans l'environnement de la tâche. Les positions des doigts sont donc des positions relatives à la position de la main.

- *La plage de variation d'entrée de l'application vers le dispositif* caractérise les données envoyées de l'application pour commander le dispositif après le traitement par l'application.

- *La plage de variation de sortie du dispositif,* représente l'intervalle des données perceptibles par l'utilisateur.

- La *précision en sortie* est déterminée par la relation entre l'intervalle d'entrée de l'application vers le dispositif et de sortie du dispositif vers l'utilisateur.

- Les *grandeurs en sortie du dispositif* sont soit des *positions* soit des *forces*.

- Un capteur possède des propriétés spécifiques (inertie, raideur, ...) qui influent sur le signal résultant du phénomène capté. La capteur est caractérisé par une fréquence minimale et une fréquence maximale (rapidité avec laquelle les données sont captées). Cet intervalle constitue la *bande passante* du signal capté.

- Nous avons défini dans ce qui précède la caractérisation d'un degré de liberté élémentaire. Le *nombre de degrés de liberté* est aussi un critère important dans le choix de l'interface. Plus ce nombre est important, plus les possibilités de l'interface sont nombreuses.

Nous avons utilisé cette taxonomie pour la caractérisation de quelques interfaces à retour d'effort *(cf. Annexe A).*

Pour réaliser des dispositifs à plusieurs degrés de liberté, nous utilisons un opérateur de fusion emprunté à la taxonomie de Mackinlay [Mac90] et Nigay [Nig94]. Cet opérateur de *Fusion* permet de fusionner plusieurs degrés de liberté pour constituer un seul dispositif. La fusion se fait à l'aide des transformations géométriques qui définissent la relation entre les différents degrés de liberté. Cette transformation peut être simple dans le cas de dispositifs orthogonaux : chaque degré de liberté effectue un déplacement dans l'application indépendamment des autres. Cette transformation peut être complexe si les degrés de liberté sont dépendants. Par exemple une position dans l'application peut être déterminée par le déplacement de plusieurs degrés de liberté. Les manipulateurs parallèles sont un exemple assez sophistiqué de tels dispositifs [Mer95].

A l'inverse de l'opérateur de fusion, nous avons un opérateur de *Fission* qui permet le découplage des degrés de liberté des dispositifs physiques. Cet opérateur est nécessaire pour le calcul des sorties de l'application vers le dispositif.

5. Taxonomie des interfaces de sorties

Dans la taxonomie précédente, nous avons considéré une interface gestuelle bidirectionnelle. A côté de la perception gestuelle, nous trouvons deux autres sens, qui sont d'ailleurs les plus utilisés, permettant la perception de phénomènes produits par ordinateur et qui sont la vue et l'ouïe.

Plage de variation d'entrée de l'application vers le dispositif de sortie	Continu[Iea_1->Iea_2]
Plage de variation de sortie du dispositif vers l'utilisateur	Continu[Isu_1->Isu_2]
Type de sortie	son, graphique
Précision	Pr
Bande Passante	Bp
Degrés de liberté	DDL_S

***Figure 1.9**: Table de caractérisation des interfaces de sortie*

Ces sens sont basés sur des effecteurs transformant des signaux produits par ordinateur en phénomènes perceptibles par l'utilisateur (les écrans transforment des positions en une luminosité perceptible par l'utilisateur, les haut-parleurs transforment un signal audio analogique en un son perceptible par l'utilisateur).

Pour la vue, les dispositifs sont l'écran de visualisation, les casques stéréoscopiques ou les lunettes à cristaux liquide, ...

Pour l'ouïe, nous trouvons les haut-parleurs et les casques acoustiques. La sortie sonore est caractérisée par le nombre de voies qu'elle utilise (on parlera de son "mono", lorsque il y a une seule source sonore et de son "stéréo" lorsqu'il y en deux). Un dispositif acoustique transforme un signal analogique en un son perceptible par l'utilisateur.

Comme pour l'interface d'entrée nous pouvons déduire de ce qui précède les caractéristiques d'une interface de sortie *(figure 1.9)*. Comme pour l'interface d'entrée, nous trouvons donc *la plage de variation d'entrée à partir de l'application, la plage de variation de sortie vers l'utilisateur, la nature de la grandeur de sortie, la bande passante* et *le nombre de degrés de liberté*. De même que pour les interfaces d'entrée, nous entendons par degrés de liberté le nombre de signaux différents. Par exemple, une image à 2 dimensions est une image à deux degrés de liberté.

On peut remarquer que cette taxonomie est une version simplifiée de la précédente. Elles peuvent être fusionnées pour n'en faire qu'une seule. Mais ceci pourrait introduire des confusions entre les interfaces d'entrées et de sorties.

6. L'Interface de Communication Instrumentale

Dans cette section, nous présentons le contexte de la communication multisensorielle tel qu'il a été défini dans notre équipe. La communication multisensorielle a été développée dans

notre laboratoire autour du concept d'Interface de Communication Instrumentale (ICI). L'ICI est une plate-forme matérielle et logicielle qui permet la modélisation et la simulation d'environnements virtuels en interaction multisensorielle avec l'opérateur humain.

La réalisation de l'interface de communication instrumentale *(figure 1.10)* a fait l'objet de plusieurs travaux. Ces travaux se sont intéressés à l'étude et au choix de la machine de simulation [Uhl96], l'étude des transducteurs nécessaire à la réalisation de l'interface à retour d'effort [Flo78] [Nou95], la conception d'un langage de modélisation [Cad84b], et aussi la conception d'une bibliothèque de modèles pour des applications robotiques, musicales ainsi que pour l'image animée.

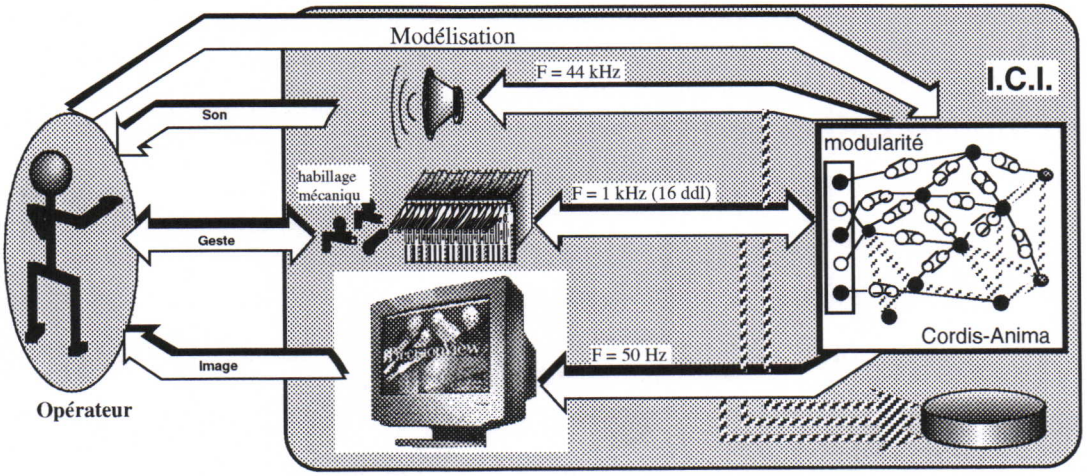


***Figure 1.10**: L'Interface de Communication Instrumentale*

L'Interface de Communication Instrumentale a pour objectif la réalisation d'une plate-forme d'expérimentation basée sur le concept de 'la représentation intégrale' des objets introduits par l'ACROE [Cad90] et dont les aspects sont les suivants :

- Multisensorialité : prise en compte de trois canaux sensori-moteurs (canal acoustique, canal visuel, canal gestuel).
- Physicalité : utilisation des modèles physiques pour la simulation du comportement dynamique des objets (comportement acoustique, visuel et kinesthésique).
- Instrumentalité : relation mettant l'accent sur l'aspect physique de l'interaction entre un utilisateur et un instrument considéré comme un vis à vis[7].

A partir de ces aspects, les trois fonctionnalités principales que doit permettre l'Interface de Communication Instrumentale ont été définies comme suit :

- *Modélisation* : l'utilisateur définit les propriétés et les caractéristiques des objets ou de l'ensemble des objets qui vont intervenir lors de l'interaction, d'une manière modulaire et la plus intuitive possible. Ceci exige la réalisation d'un langage de haut niveau permettant à l'opérateur de réaliser ces objets sans se soucier des équations mathématiques qui les produisent.

[7]vis-à-vis : L'utilisateur et l'instrument sont l'un en face de l'autre ; l'utilisateur peut défaire la liaison à tout instant, à l'opposé des dispositifs à immersion où l'instrument est fixé sur l'opérateur.

- *Simulation* : une fois l'environnement construit, la simulation va se charger de calculer à chaque instant son comportement dynamique et géométrique (déplacements et déformations des objets).

- *Acquisition/Restitution* : à chaque pas de simulation, s'exécute un processus de communication bidirectionnel et multisensoriel entre l'opérateur et les différents objets virtuels qu'il manipule.

  Une fonction importante de l'ICI est donc l'acquisition de l'information émise par l'utilisateur au moment où celui-ci interagit avec l'instrument de commande et son émission vers la tâche. Une autre fonction importante est la fonction symétrique qui consiste à extraire l'information caractéristique de l'environnement de la tâche et à l'envoyer à l'utilisateur. Cette phase de restitution est nécessaire pour informer l'utilisateur sur l'évolution de la tâche.

- *Édition des entrées et des sorties* : L'intérêt supplémentaire de cette phase par rapport à ce qui existe déjà pour les sorties standard visuelle et auditive est la possibilité de récupérer des signaux gestuels pour une utilisation ultérieure d'analyse, de traitement, d'apprentissage ou d'exécution différée. Par exemple, on peut enregistrer le geste d'un utilisateur expérimenté pour l'entraînement d'un utilisateur débutant.

L'objectif de cette interface n'est pas uniquement de réaliser des objets animés ou des objets sonores, manipulables gestuellement, mais également de permettre l'expérimentation de nouveaux dispositifs physiques de manipulation gestuelle et ainsi d'améliorer les performances de l'utilisateur dans ses interactions avec le monde réel ou virtuel.

7. Conclusion

Nous avons commencé ce chapitre par l'étude des différentes possibilités d'interactions entre un utilisateur humain et un ordinateur. Ensuite, nous avons défini ce que nous entendons par "communication multisensorielle". Puis, nous avons étudié les différentes taxonomies proposées actuellement [Bux83][Mac90][Lip93]. Nous avons étudié les avantages et les faiblesses de chacune d'elles et montré en quoi elles ne sont pas adaptées à la caractérisation des interfaces à retour proprio-tactilo-kinesthésique. L'étude de ces taxonomies nous a aidé à définir notre propre taxonomie des interfaces à retour d'effort.

Ce chapitre nous a aussi permis de présenter le contexte de nos recherches et le concept d'Interface de Communication Instrumentale. Nous avons montré que pour avoir une communication multisensorielle tenant compte des performances gestuelles, visuelles et acoustiques de l'utilisateur, l'outil informatique doit permettre de modéliser l'environnement virtuel, de le simuler, et de supporter l'interaction avec cet environnement. Dans le chapitre qui suit nous allons présenter les méthodes de mesures des perceptions humaines nécessaires pour comprendre les limites et les performances de l'utilisateur humain.

Chapitre 2

Psychophysique

« Un fait n'est rien par lui même, il ne vaut que par l'idée qui s'y rattache ou par la preuve qu'il fournit »

Claude Bernard

Dans le travail qui suit nous allons présenter les méthodes générales pour étudier le comportement humain. Nous présenterons quelques concepts et méthodes de la psychophysique, domaine qui fait partie de la psychologie expérimentale, et qui s'est particulièrement intéressé à l'évaluation de seuils de différenciation entre divers stimuli perçus par le sujet.

1. Les étapes de la psychophysique

La distinction entre réalité objective et réalité perçue est le premier point important à considérer : il existe une différence entre ce qui est et ce qui est perçu. L'un relève du physique de la situation, l'autre du psychologique. La psychophysique s'intéresse aux aspects psychologiques ainsi qu'à la relation entre le physique et le psychologique.

Un de ses buts est depuis longtemps de procéder à des évaluations quantitatives d'intensité à l'intérieur de chaque système (*figure 2.1*) :

Stimulus -> Récepteur->Sensation

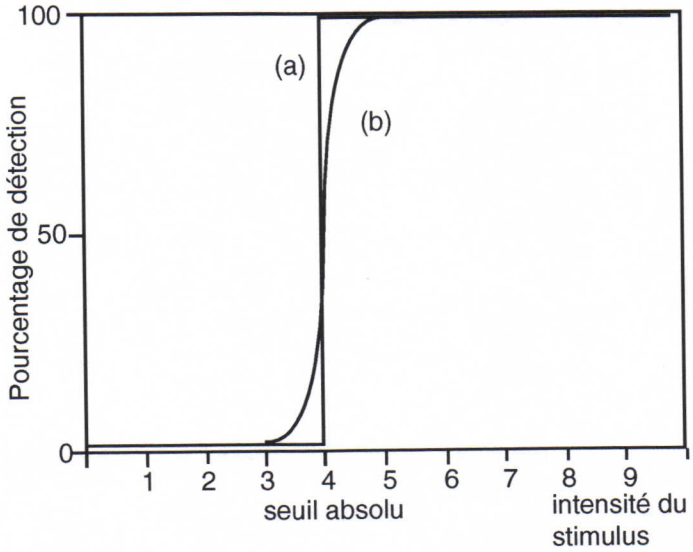


***Figure 2.1** : Détection et intensité du stimulus (Bus82) a) détection dès que le seuil théorique d'intensité absolue est atteint; b) courbe plus proche de la réalité illustrant la théorie de détection du signal*

Dans cette perspective, plusieurs questions essentielles se posent, en utilisant comme variable dépendante l'expérience sensible, autrement dit le vécu du sujet. Les deux premières questions : (i) y a-t-il un stimulus ? (ii) qu'est-ce que ce stimulus ? se rapportent l'une à la détection du signal et l'autre à sa reconnaissance comme appartenant à une qualité plutôt qu'à une autre.

Deux autres questions se posent : (iii) étant donné un stimulus d'une certaine intensité, ce stimulus a-t-il oui ou non varié ? Nous sommes encore devant une détection, mais qui concerne cette fois la variation d'une intensité supraliminaire. Il s'agit en l'occurrence d'une mesure de discrimination, autrement dit d'un seuil différentiel. (iv) La dernière interrogation qui se présente est celle d'une évaluation absolue de la sensation (combien ?). Les problèmes liés à ces estimations d'intensité seront examinés dans ce qui suit.

Du paragraphe précédent, nous pouvons envisager quatre étapes définies en psychophysique :

- **La reconnaissance :** C'est la manière de déterminer si un signal ou un stimulus existe ou non, par rapport au seuil absolu d'un système. *Le seuil absolu* d'intensité est la plus petite intensité d'un stimulus qui peut être détecté par un sujet. Ce seuil marque une coupure dans le continuum des stimuli d'une qualité donnée, séparant ceux pour lesquels l'organisme ne répond pas de ceux pour lesquels il répond.

Il appartient ainsi à chaque domaine de sensation de déterminer ce seuil pour chacune de ses qualités particulières. Il en sera fait état ultérieurement.

- La discrimination : C'est la manière de décider si deux stimuli sont identiques ou non. Dans ce paradigme expérimental, les sujets doivent distinguer entre deux stimuli qui diffèrent légèrement, généralement suivant une dimension. Par exemple deux tonalités peuvent avoir la même fréquence, mais être différentes en intensité. La plus petite nuance détectée entre deux stimuli de même nature mais d'intensité différente par un sujet est appelée "la différence juste perceptible" (d.j.p.) ou "just noticiable difference" (j.n.d.) ou *seuil différentiel.*

La plupart des travaux effectués en psychologie expérimentale se sont intéressés à la manière selon laquelle le seuil absolu varie avec d'autres paramètres de l'expérience comme la fréquence, l'intensité ou l'adaptation au cours du temps.

Après les premières constatations de Bouguer à propos de la perception de différences d'éclairement, c'est E.H.Weber qui, en travaillant sur la discrimination de poids, a déterminé que 2 poids de grandes valeurs doivent avoir une différence plus importante que 2 poids de faibles valeurs pour être discriminés. En d'autres mots, il a découvert que le seuil différentiel pour le poids augmente avec la valeur du poids. Il a montré de plus que le rapport du seuil différentiel sur celui de la valeur de la stimulation est constant. Ce rapport est appelé *la fraction de Weber ou loi de Weber.* La relation linéaire entre le seuil différentiel de la stimulation et l'intensité de la stimulation est valable pour d'autres modalités, la valeur de la fraction de Weber dépend de la modalité [Bus82] (1% pour la brillance lumineuse, 5% pour la sensation tactile, 15 % pour le chaud ou le froid, ...).

Cette relation linéaire, appelée loi de Weber, est représentée par :

$$\Delta\Phi = c.\Phi \qquad \text{ou} \qquad \frac{\Delta\Phi}{\Phi} = c$$

où $\Delta\Phi$ est la différence entre un stimulus de référence et le seuil de sensibilité. Φ est l'intensité de la valeur de référence ; c est la constante de la fraction différentielle ou fraction de Weber.

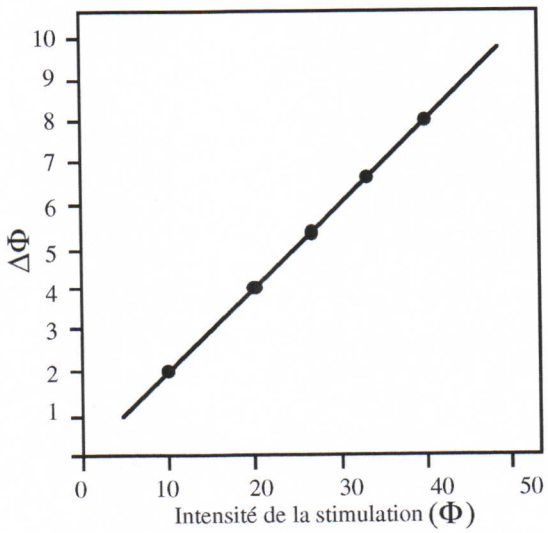


Figure 2.2 : *Fonction qui suit la loi de Weber [Ges85]*

La loi de Weber est vérifiée pour une grande variété de types de stimuli. Malheureusement, pour des petites intensités approchant la valeur absolue du seuil différentiel, la fraction de Weber tend vers l'infini. Dans ce cas, la fonction la mieux adaptée aux données peut être obtenue en ajoutant un terme constant additif, a, au terme de stimulation de référence :

$$\frac{\Delta\Phi}{\Phi + a} = c$$

Le seuil différentiel et la loi de Weber sont à la base de plusieurs études sur la perception, et seront importants pour l'interprétation de certains résultats de nos expériences.

L'appréciation subjective de l'intensité du stimulus montre que la sensation n'augmente pas autant que le stimulus. Ainsi, un son d'une intensité double de celle d'un autre n'est pas perçu comme étant deux fois plus fort parce que la sensation augmente moins vite que l'excitation. C'est ce que matérialise la loi de Fechner : la sensation croît comme le logarithme de l'intensité du stimulus, à une constante près :

S = A.Log I

où S indique l'intensité sensorielle,

Log I le logarithme de l'intensité du stimulus,

A une constante.

Il existe des similitudes entre les lois de Weber et de Fechner, toutes deux illustrant une relation entre l'augmentation de l'intensité du stimulus et la modification de la sensation qui en résulte. Les relations stimulus-sensations pourraient être plus complexes et d'une double nature logarithmique selon Stevens (1961) qui a formulé ainsi sa loi de puissance:

log S = b log I+ log k,

où log S indique le logarithme de la sensation,

log I le logarithme de l'intensité du stimulus,

b la pente de la courbe,

log k une constante.

De façon générale nous percevons davantage les inter-relations entre stimuli que leur intensité physique absolue. C'est ainsi qu'un stimulus isolé est automatiquement comparé à des stimuli antérieurs dont les caractéristiques ont été gardées en mémoire.

- L'identification : C'est une troisième étape qui revient à associer un stimulus à une des catégories définies. Par exemple, on peut demander à un sujet d'identifier le nombre de tonalités différentes qu'on lui fait écouter. Ainsi par exemple, le nombre moyen de tonalités que les sujets peuvent identifier est 7 (± 2). Au-delà, le taux d'erreurs augmente. Ces résultats sont généralement valables pour des stimulations variant suivant une seule dimension. Par contre si la dimension est supérieure à 1, plusieurs catégories différentes peuvent être identifiées. Par exemple, les êtres humains peuvent reconnaître plusieurs figures

et mots écrits, et ceci parce que les mots et les figures sont différentes les unes des autres de plusieurs manières.

- **Le classement (l'estimation ou le jugement quantitatif)** : C'est une quatrième étape où l'on cherche à estimer des perceptions par intensité ou par qualités.

Dans l'évaluation quantitative des perceptions, quatre types de classements peuvent être effectués : nominal, ordinal, par intervalle, et selon un rapport. L'échelle est déterminée par les propriétés des valeurs qui lui sont associées : identité, ordre, intervalle, origine.

Pour un classement nominal, le nombre associé à un sujet est utilisé pour l'identifier. Par exemple, les numéros de joueurs dans une équipe sportive. Le nombre est indépendant des propriétés de l'objet auquel il est associé.

Pour le classement ordinal, les objets sont classés d'une manière bien précise, par exemple le classement des coureurs à la fin d'une course suivant l'ordre d'arrivée. Le classement ordinal n'est utile que pour la spécification suivant un ordre croissant ou décroissant.

Le classement par intervalle, est appliqué au classement des différences entre deux valeurs. Exemple, la tension électrique, ou la température. La valeur absolue de ces valeurs n'a pas de sens, mais la variation ou l'intervalle dans l'échelle peuvent être comparé. La différence de potentiel entre 10 et 15 volts est la même qu'entre 0 et 5 volts.

Le classement selon un rapport, en plus du classement par ordre et par intervalle, permet de représenter la quantité zéro d'une propriété. Les degrés Fahrenheit et les degrés Celsius sont des exemples de classement par intervalle puisque la température correspondant à 0 degrés est arbitraire et n'a pas de signification particulière. L'échelle de Kelvin, est un classement selon un rapport puisque le degré zéro représente le zéro absolu (pas d'agitation moléculaire donc pas de d'échauffement). Il est juste de dire que 200° K est deux fois plus chaud que 100° K. Le rapport entre les valeurs a une signification.

Un des problèmes souvent lié au classement des perceptions, est la dépendance entre le résultat de l'expérience et la manière de présentation des stimuli aux sujets. Dans ce cas, une combinaison différente des mêmes stimuli donnerait des évaluations différentes.

2. Méthodes psychophysiques classiques pour la détermination du seuil absolu et différentiel

La difficulté principale dans la détermination du seuil différentiel est que lorsque nous présentons aux sujets des stimuli identiques à plusieurs occasions, ils ne répondent pas toujours de la même manière. Par exemple, un signal détecté pendant une première expérience peut ne pas l'être dans une expérience suivante. La frontière entre les stimuli qui sont toujours détectés et ceux qui ne le sont pas n'est pas parfaitement déterminée. Une des raisons à cela (en supposant que l'appareillage de l'expérimentation est parfait et n'introduit pas de bruit), est que le système neurosensoriel est lui même bruité. Une autre raison est due

à la différence dans la concentration, l'apprentissage et l'adaptation du sujet soumis aux expérimentations. Nous allons décrire dans la suite les trois méthodes générales pour déterminer le seuil absolu et le seuil différentiel. On distingue les méthodes de la stimulation constante, de la stimulation limite et de la stimulation ajustée.

2.1. Méthode des stimuli constants

Cette méthode est aussi appelée méthode des cas vrais et faux. Le nom de "méthode de la stimulation constante" a été donné par G.E. Müller. Elle consiste à appliquer dans un ordre imprévisible pour le sujet une gamme de stimuli qui débute par les valeurs infraliminaires jusqu'aux valeurs supraliminaires.

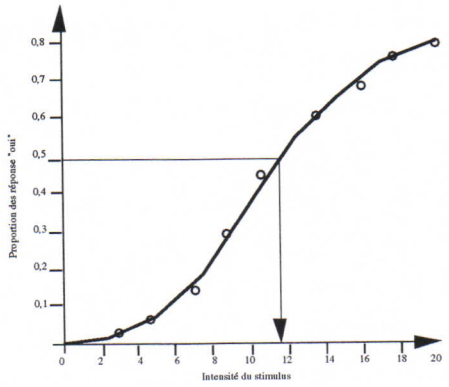


Figure 2.3: *fonction psychométrique pour la mesure du seuil absolu en utilisant la méthode des stimulations constantes [Ges85]*

Seuil absolu : lorsque nous mesurons le seuil absolu en utilisant la méthode de la stimulation constante, l'expérimentateur présente au sujet le même stimulus à plusieurs reprises. Généralement de cinq à neuf valeurs différentes de stimuli sont utilisées, dont l'intensité varie entre ceux qui ne sont jamais détectés et ceux qui le sont toujours. A chaque essai, le sujet répond par "oui" s'il détecte les stimuli, et par "non" dans le cas contraire. L'intensité du stimulus pour lequel la proportion de réponse "oui" est de 50 % est prise comme le seuil absolu de détection.

La fonction psychométrique résultante entre l'intensité du stimulus et le pourcentage de "oui" a typiquement la forme de S de la fonction "sigmoïde" *(figure 2.3)*.

Seuil différentiel : La méthode de la stimulation constante peut être aussi utilisée pour différents seuils. La procédure est similaire à la mesure des seuils absolus. Les stimulations sont présentées par paires. Les stimulations dans chaque paire sont séparées par un intervalle temporaire ou par une distance. Un stimulus représente le stimulus de référence et l'autre représente le stimulus de comparaison. A chaque essai, le sujet indique si le stimulus de comparaison est "plus fort" ou "plus faible" que la référence. Les données typiques pour le seuil différentiel mesuré avec la méthode des stimulations constantes sont représentées à la *figure 2.4*.

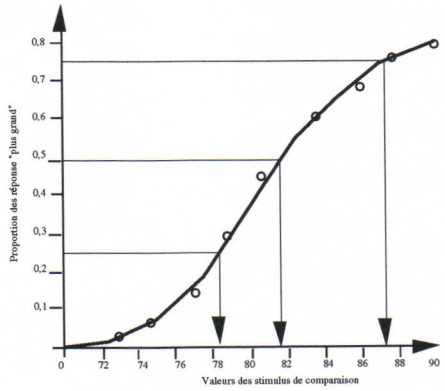


Figure 2.4: *fonction psychométrique pour la mesure du seuil différentiel [Ges85]*

La proportion de réponse "Plus fort" égale à 0,5 représente une incapacité complète à discriminer les stimulations. Par contre une proportion de 0,0 ou 1,0 représente une discrimination parfaite. Les valeurs de stimulation proportionnelle à 0,25 ou 0,75 de réponse "plus fort" sont arbitrairement utilisées pour représenter le seuil différentiel. Le seuil différentiel est égal dans ce cas à la demi-différence entre les stimuli de comparaisons rapportés aux proportions de réponse "plus fort" pour les proportions choisies (ici 0,25 et 0,75).

Par exemple, le seuil différentiel pour les données dans la *figure 2.4* est :

$$0,5\ (\ 81,5 - 78,5) \ = \ 1,5.$$

2.2. Méthode des limites

La méthode des limites n'est pas aussi précise que la méthode de la stimulation constante. Mais c'est la technique la plus commune pour la mesure des seuils sensoriels parce qu'elle nécessite beaucoup moins de temps. Elle est aussi utile pour trouver une estimation préliminaire du seuil pour réaliser une expérience utilisant la méthode de la stimulation constante. Cette méthode a été employée d'abord par Weber et Fechner pour la mesure du seuil différentiel sous le nom de méthode des différences juste perceptibles, puis par Wundt, sous le nom méthode de variation minimale. Kräpelin, en 1891, lui aurait donné le nom de méthode des limites.

<u>Seuil absolu</u> : Lors de la mesure du seuil absolu par la méthode des limites, l'expérimentateur commence par présenter un stimulus au-dessus ou au-dessous du seuil. A chaque essai, le sujet indique la détection du stimulus par un "oui" et la non détection par un "non". Si le premier stimulus est présenté au-dessous du seuil, l'expérimentateur augmente l'intensité des stimuli dans les essais successifs, jusqu'à ce que le sujet change sa réponse de "non" à "oui". Si le premier stimulus est au-dessus du seuil, les stimuli sont graduellement diminués à chaque essai jusqu'à ce que le sujet change sa réponse de "oui" à "non". Une série est terminée immédiatement après le premier changement dans la réponse, et le point de transition pour cette série est pris comme la valeur de la stimulation entre les deux derniers stimuli.

Typiquement, plusieurs séries ascendantes et descendantes sont réalisées, le seuil absolu est la moyenne de la transition de toutes les séries. Réaliser la moyenne pour plusieurs séries, en alternant entre des séries ascendantes et descendantes, aide à compenser quelques unes des erreurs dues à l'habitude (tendance à donner toujours la même réponse) et la prévision (la tendance de changer de réponse basée sur la prévision du stimulus qui va arriver). Une autre technique utilisée pour compenser les erreurs est de commencer chaque série ascendante ou descendante en donnant des amplitudes différentes du stimulus.

Seuil différentiel : La méthode des limites implique la présentation des stimuli par paires, une référence et un stimulus de comparaison. On demande au sujet d'indiquer si le stimulus de comparaison est plus grand, plus petit ou égal à la référence. Les stimuli de référence et de comparaison peuvent être présentés séquentiellement dans le temps, ou au même moment et à différentes positions (spatialement séparées).

Une série de présentation commence par un stimulus de comparaison assez grand ou assez petit par rapport à la référence.

Pour une série ascendante, la transition entre les réponses "plus petit", et les réponses "égal" est le point de transition bas. La transition de "égal" à "plus grand" est le point de transition "haut".

Le seuil différentiel est la demi différence entre la transition "petite" et "grande".

Dans le cas du seuil absolu, on doit prendre quelques précautions dans la réalisation de l'expérience pour contrôler l'effet de l'habitude et l'effet de la prévision du sujet.

2.2.1. Méthode dite "en escalier"

La méthode "en escalier" (Staircase Method) est une variation de la méthode des limites pour le calcul du seuil différentiel. Après un point de transition, au lieu de terminer une série et recommencer une autre, on inverse uniquement la direction de la stimulation. On continue la procédure jusqu'à l'obtention d'un certain nombre de points de transition. Le seuil est la moyenne de tous les points de transition. La méthode a l'avantage de prendre très peu de temps, le nombre de valeurs qui sont très au-dessus ou au dessous du seuil étant restreint.

2.3. Méthode des ajustements

Dans la méthode des ajustements, appelée aussi méthode du point central [Fra74], les sujets eux mêmes ont un contrôle direct à travers l'intensité variable du stimulus continu. Un des avantages de cette méthode est que le sujet participe activement. Elle réduit l'ennui et augmente la concentration.

Cette méthode est généralement utilisée pour mesurer le seuil différentiel, mais elle peut être aussi utilisée pour mesurer le seuil absolu.

Seuil absolu : A chaque essai, l'expérimentateur initialise la valeur du stimulus au-dessus ou au-dessous du seuil, et demande au sujet de faire décroître l'intensité du stimulus (en utilisant un bouton ou un contrôle similaire) jusqu'à ce qu'il disparaisse, ou bien inversement de le

faire augmenter jusqu'à ce qu'il apparaisse. Le seuil absolu est pris comme étant la valeur finale après plusieurs essais.

Seuil différentiel : Quand on mesure le seuil de différence en utilisant la méthode des ajustements, on demande au sujet d'ajuster un stimulus de comparaison jusqu'à ce qu'il corresponde à un stimulus de référence. Parfois la valeur de correspondance sera trop petite, parfois trop grande, mais l'erreur moyenne relative à plusieurs essais peut être petite. Si les essais sont réalisés en nombre suffisant, la distribution de la correspondance sera approximativement celle d'une distribution normale, et la mesure de dispersion des données ainsi que la déviation standard sont utilisées comme mesure du seuil différentiel. Pour des meilleurs résultats, les stimuli de référence et de comparaison peuvent être présentés en même temps.

Nous avons introduit dans ce qui précède trois méthodes de détermination du seuil absolu et du seuil différentiel. Dans toutes les expériences réalisées dans le travail qui suivra, nous avons utilisé la variante de la méthode des stimulations constantes.

3. Conclusion

La détermination des seuils absolus et des seuils différentiels pose une série de problèmes. Les uns sont purement méthodologiques et d'ailleurs très classiques, comme les solutions apportées : il s'agit de s'entourer, dans ces évaluations, de toutes les précautions pour éviter certains biais et certains artefacts, qu'il s'agisse des valeurs liminaires absolues ou des valeurs différentielles, compte tenu de leur variabilité intra- et inter-individuelle importante.

D'autres méthodes ont été développées pour déterminer les seuils absolus et différentiels connues sous le nom de la théorie du signal [Bus82]. A l'origine, le problème de détection du signal (y a-t-il ou non un stimulus ?) s'est développé à propos des déterminations de seuil absolu. On s'est bien entendu vite aperçu que dans de telles déterminations, les valeurs obtenues étaient très instables. Et bien que l'aptitude (capacité actuelle, état d'âme) du sujet ne fût pas prise en compte sérieusement, on reconnaissait qu'elle affectait l'estimation du seuil.

Une remarque terminale soulignera toutefois l'intérêt et l'impact essentiel de ces données : elles montrent comment, contrairement à la psychophysique traditionnelle, qui voyait le sujet comme relativement immuable et les seuils comme des valeurs fixes qu'il fallait cerner, la théorie de la détection fait maintenant place aux conditions dans lesquelles se trouvent le sujet et prend en compte l'influence de divers facteurs (anticipation, motivation) sur les capacités de discrimination. Du point de vue général, on retient que la théorie de la détection introduit en quelque sorte l'observation et sa stratégie propre dès le stade initial du processus élémentaire de la sensation et non seulement, comme il était traditionnellement admis, uniquement dans celui plus complexe des processus perceptifs.

Malheureusement, la théorie de détection du signal est difficile à mettre en œuvre. Pour cela, deux procédures de base ont été utilisées en parallèle avec la théorie de la détection du signal : la procédure Oui-Non et la procédure du choix forcé. Ces procédures produisent des résultats facilement convertibles dans un contexte théorique tel que la détectabilité et le rapport de vraisemblance critique. La procédure oui-non est probablement la plus simple conceptuellement, mais exige une grande quantité de données mesurées. Ceci implique un temps d'expérimentation très important. La procédure du choix forcé a l'avantage d'être efficace, elle utilise des suppositions de la théorie de détection du signal pour sa validité.

Dans ce chapitre nous avons présenter les méthodes de base pour caractériser les perceptions humaines. Nous avons vu les méthodes de déterminations du seuil absolu et du seuil différentiel. Ces méthodes seront utilisées pour la mise en oeuvre du protocole d'expérimentation de la perception proprio-tactilo-kinesthésique à travers notre dispositif de manipulation à retour d'effort.

Dans le chapitre suivant, nous allons faire souvent référence à ce qui a été étudié dans ce chapitre, tel que le seuil absolu, le seuil différentiel et la fraction de Weber.

Chapitre 3

Les fonctionnalités du geste

"... la main, organe perceptif, est aussi principalement l'organe privilégié d'exécution des actions pratiques instrumentales sur le monde extérieur. Et si elle peut prendre connaissance des propriétés des objets, la main peut aussi transformer ces propriétés en agissant matériellement sur ces objets (en les cassant, on les tordant, en les pliant, etc. ...). Rien de tel n'est évidemment possible avec les yeux qui, si actifs qu'ils soient, restent toujours des purs organes de perception. (...) Les déplacements de l'oeil, qu'ils soient dus à sa musculature propre ou à une rotation de la tête, du cou, du tronc, ou du corps tout entier, ... ne peuvent jamais modifier, de quelque façon que ce soit, l'état physique ou spatial de l'environnement. "

Yvette Hatwell [Hat81]

Ce qui caractérise essentiellement le geste, c'est l'indissociable imbrication de sa fonction motrice avec sa fonction perceptive. En fait, aucune des "modalités sensorielles" (ou plutôt sensori-motrices) ne fonctionnent en purs récepteurs passifs. Elles sont dotées d'une musculature qui leur confère des propriétés motrices permettant l'exploration de l'environnement. Cependant la motricité du geste a ceci de particulier qu'elle peut transformer les propriétés des objets sur lesquelles elle s'applique.

Agir sur l'environnement physique n'implique pas uniquement nos yeux mais tout notre corps. Donc la réalisation d'un interface homme-ordinateur conviviale nous entraîne à tenir compte de tous les canaux sensoriels et sensori-moteurs dont nous sommes munis, pour améliorer ainsi l'action de l'opérateur sur l'environnement informatisé, et plus particulièrement dans notre cas, sur les objets virtuels simulés avec un ordinateur.

Un être humain reçoit et combine deux types d'informations perceptuelles lorsqu'il touche et manipule des objets. Une information proprio-kinesthésique décrit la position et le mouvement relatif des organes corporels mais aussi des efforts musculaires. Les informations tactiles décrivent les différentes pressions spatiales sur la peau pour une position fixe d'un corps donné. Le toucher combine étroitement des informations tactiles et proprio-kinesthésiques. Dans la littérature, on rencontre souvent le terme haptique pour parler de cette perception proprio-tactilo-kinesthésique.

"La motricité de la main permet de produire des mouvements qui vont être tantôt destinés à la perception de propriétés des objets (mise en place et maintien actif des récepteurs de la source, activité exploratoire de palpation), et tantôt destinés à changer la position spatiale ou les propriétés de ces objets (les transporter, les couper, les piler, les coller ensemble, ...)"

Y.Hatwell [Hat81]

Dans ce chapitre nous allons présenter un état de l'art sur les interactions gestuelles en nous basant sur la typologie du geste élaborée par C.Cadoz [Cad94b] dans laquelle il définit trois fonctionnalités du geste : épistémique, ergotique, et sémiotique. Chacune de ces fonctions sera caractérisée et on présentera les différents travaux les illustrant.

1. Les fonctionnalités du geste

Dans sa classification des fonctions du geste, Cadoz [Cad94b] met en avant trois fonctions différentes de la main, complémentaires et imbriquées : une *fonction épistémique* , une *fonction ergotique* et une *fonction sémiotique*.

• La fonction épistémique, représente la première fonction sensorielle de la main à laquelle on pense ; il s'agit du sens du toucher. Dans ce cas, la main est un organe de perception tactilo-proprio-kinesthésique qui permet la perception des informations relatives aux structures physiques de l'environnement, telles que la température, la pression, l'état de la surface d'un objet, sa dureté, sa mollesse, sa forme, son orientation, sa distance et sa taille, son poids, ses structures articulaires, ses propriétés de plasticité ou de déformabilité et ses mouvements. Cette fonction est en jeu dans différentes interfaces de communication Homme-Machine utilisant des systèmes à retour d'effort *(cf. Annexe A)*.

• La fonction ergotique correspond à l'action matérielle de la main sur l'environnement physique ; celle-ci peut modifier la matière, la modeler, la transporter, l'usiner, la briser, etc. Elle lui communique non pas de l'information, mais de l'énergie ; elle applique des forces,

des déformations et des déplacements aux objets et ces derniers lui résistent de diverses manières, lui renvoyant parfois une part de cette énergie. En ingénierie des interfaces homme-ordinateur, les outils aptes à supporter ce type de geste sont les systèmes à retour d'effort, qui sont à ce jour très peu répandus. On utilise à leur place le clavier, la souris, le trackball ...etc., qui par le fait qu'ils ne permettent pas de retour d'énergie vers l'opérateur, sont plutôt adaptés à l'exercice de la fonction sémiotique (voir ci-dessous).

• La fonction sémiotique est portée par tous les gestes qui produisent un message informationnel à destination de l'environnement. Un cas assez représentatif du geste sémiotique est la langue des signes par les sourds-muets, où la parole est complètement remplacée par la gestique de la main. La gestique du chef d'orchestre s'adresse aussi à la vision et représente également une fonction sémiotique. Mais les principaux gestes effectués aujourd'hui devant un ordinateur (manipulation d'une icône par la souris, ...) relèvent de la fonction sémiotique. Beaucoup de travaux récents en Communication Homme-Machine et dans le domaine des Réalités Virtuelles se sont basés sur l'interprétation du geste sémiotique pour commander, planifier et agir sur l'environnement produit par l'ordinateur. Par exemple, le système ISUA de Paris 8 [Maz93], Videodesk [Kru91], Charade [Bau93].

C.Cadoz [Cad94b] montre que le canal gestuel est intéressant parce qu'il possède ces trois fonctions, mais plus encore parce qu'il les combine, en particulier dans la modalité qu'il appelle le geste instrumental. Le geste instrumental se défini en premier lieu par le fait qu'il s'applique à un objet physique. Action physique sur un objet physique, il a une finalité : par exemple produire un message dans le cadre d'un processus communicationnel. C'est le cas dans l'écriture manuelle et le dessin. L'information symbolique produite (texte, musique, dessin ...) l'est lors d'un rapport physique avec un objet matériel : le crayon, le pinceau, le violon... et elle est fortement déterminée par cet exercice physique. L'objet, qui produit ainsi de l'information à partir d'une relation physique à un être humain, prend alors le statut d'instrument. L'être humain prend le statut d'instrumentiste et son geste devient un geste "instrumental". Une des premières conséquences est qu'il n'est plus véritablement possible de parler du geste sans évoquer les propriétés de ce à quoi il s'applique, ni de ce qu'il permet de créer.

Le geste instrumental est considéré comme une modalité de communication spécifique au canal gestuel, complémentaire du "geste à nu" et il est caractérisé de la façon suivante :

- il s'applique à un objet matériel, avec lequel il y a une interaction physique,

- dans le cadre de cette interaction se produisent des phénomènes physiques différenciés dont les formes et les évolutions dynamiques peuvent être maîtrisées par le sujet.

- ces phénomènes peuvent alors devenir les supports de messages communicationnels.

2. La fonction épistémique

2.1. Physiologie de la perception proprio-tactilo-kinesthésique

Dans cette partie nous présentons les mécanorécepteurs de la peau, les muscles et les articulations qui sont importants pour la perception proprio-tactilo-kinesthésique.

La peau constitue la frontière et le point de contact du corps humain avec le milieu extérieur. Elle possède une multitude de récepteurs qui répondent à des excitations thermiques, nociceptives (douleurs) ou mécaniques (toucher, pression, vibration). La combinaison de certaines d'entre elles conduit à la sensation de vibrations, de démangeaisons ou de "chatouilles".

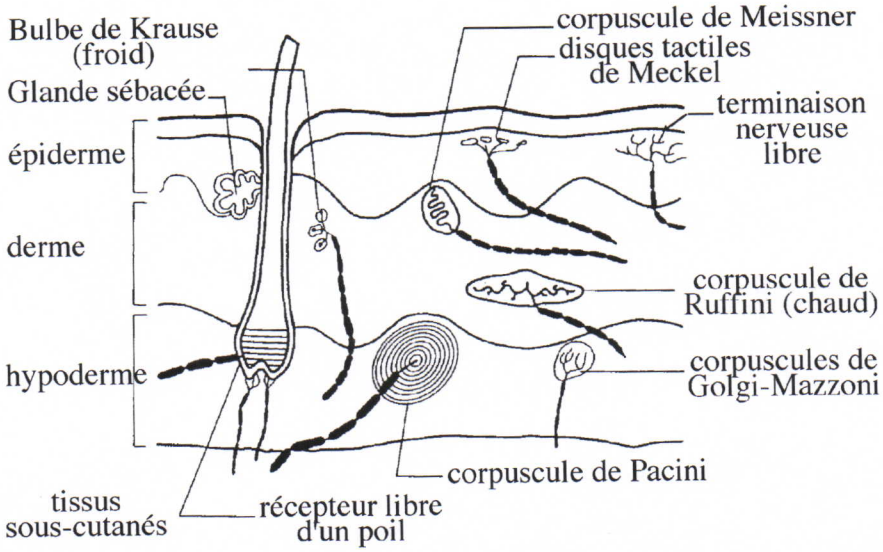


***Figure 3.1** : Morphologie des récepteurs cutanés [Rig85]*

Les différentes couches constituant la peau *(figure 3.1)*, (épiderme, derme et hypoderme) contiennent chacune des récepteurs spécifiques de la douleur, du tact, de la température et de la pression. Dans l'épiderme nous trouvons les *terminaisons nerveuses libres* qui forment les récepteurs sensibles aux excitations douloureuses. D'autres terminaisons supportent de petits disques appelés *disques tactiles de Merckel* sensibles au toucher léger ou effleurement de la peau. Dans le derme nous trouvons les *corpuscules encapsulés de Meissner* réagissant à la pression. Dans l'hypoderme nous trouvons les *corpuscules de Golgi-Mazzoni* sensibles aux faibles pressions et les *corpuscules de Pacini* sensibles aux fortes pressions.

La perception de la position du membre et son mouvement semble due aux réafférences issues des faisceaux musculaires, qui mesurent la longueur, et celles des *corpuscules tendineux de Golgi* qui mesurent la tension [Hou79].

2.2. Étude sur les perceptions d'environnement simple

Un certain nombre d'études ont été réalisées pour examiner la perception des forces, de la compliance, de la viscosité et de l'inertie. La mesure de la raideur, de la viscosité et de la masse est réalisée en utilisant les signaux de forces ou/et de positions car il n'existe pas de capteurs de viscosité ou de raideur.

Jones [Jon90] a conduit une étude dans laquelle le sujet utilise un outil à un degré de liberté attaché au poignet pour différencier des stimuli de forces. La fraction de Weber (le rapport seuil différentiel sur stimulus de référence) obtenue pour cette expérience est de 7%. Pang, Tan et coll. [Pan91] ont mesuré le seuil différentiel pour une force appliquée entre le pouce et l'index. La force est appliquée tout d'abord en utilisant un paradigme à déplacement constant (le déplacement total est le même d'un essai à l'autre), et ensuite un paradigme à déplacement libre (le déplacement total change d'un essai à l'autre). Ils observent une force différentielle moyenne de 6% pour le paradigme à déplacement fixe, et une force différentielle moyenne de 14% pour le déplacement libre. Ils ont conclu que le seuil différentiel de la force est indépendant du déplacement lorsque celui-ci est fixe, mais décroît linéairement avec le déplacement lorsque ce déplacement est libre. Ce résultat suggère que le travail peut avoir une influence sur la discrimination des forces.

Certaines de ces équipes se sont intéressées aussi à la mesure du seuil différentiel pour la raideur. Jones et Hunter [Jon90] ont estimé le seuil différentiel pour la raideur à 23%. Dans leur expérience, chaque poignet du sujet est lié à un manipulateur à 1 DDL, et le sujet essaye de faire correspondre les raideurs des deux manipulateurs. Tan et coll.[Tan95] de leur côté ont mesuré la discrimination manuelle de la compliance (inverse de la raideur) durant la saisie dans trois expériences différentes. Dans la première expérience, l'élasticité ne se manifeste pas avant le mouvement (force élastique nulle au démarrage ; manipulateur au repos sans précontrainte) et le déplacement total dans chaque essai est le même, le seuil différentiel de la compliance a une moyenne de 8% pour le sujet testé, et est indépendante du déplacement total. Dans une deuxième expérience, l'élasticité ne se manifeste pas avant le mouvement, mais le déplacement total varie d'un essai à l'autre. Ceci à donné un seuil différentiel moyen de 22%. Plus exactement, le seuil différentiel de la compliance n'est pas indépendant du déplacement, mais décroît régulièrement avec le déplacement total. Dans la dernière expérience, l'élasticité se manifeste dès le début du déplacement (force élastique non nulle au démarrage, manipulateur précontraint), et le déplacement total reste constant d'un essai à l'autre, afin que le travail mécanique pour compresser les différents ressorts soit le même. Dans ces conditions le seuil différentiel de la compliance a varié de 15% à 99%. Les trois expériences réalisées suggèrent que la force terminale est très importante pour l'élimination de la compliance (d'où la dégradation des performances quand le déplacement total varie d'un essai à l'autre).

La capacité humaine pour percevoir différentes amplitudes d'amortissement et de moment d'inertie a aussi été étudiée. La fraction de Weber pour l'amortissement a été mesurée par Jones et Hunter [Jon93]. Les sujets ajustent la viscosité du manipulateur tenu par une main de façon qu'il ait la même viscosité que celui tenu dans l'autre main. La fraction de Weber est de 34% pour les viscosités comprises entre 20 et 1024 N.s/m. Le seuil différentiel pour le

moment d'inertie a été mesuré entre 28% et 113% par Kreifeldt et Chuang [Kre79] et par Ross et Benson, [Ros86]. Beauregard et coll. [Bea95] ont mesuré le seuil différentiel de la viscosité et de l'inertie pour un sujet tenant un manche et ont observé un seuil différentiel pour la viscosité de 14% lorsque la viscosité de référence est de 120 N.s/m, et le seuil différentiel de l'inertie est de 21% pour une référence de 12 Kg.

2.3. Perception d'environnements complexes

Les expériences psychophysiques décrites dans la partie précédente sont limitées à la perception de la force constante et d'impédance d'environnement linéaire constant. Bien que ces résultats soient valables pour comprendre certaines propriétés de niveau bas du système perceptuel, elles ne représentent pas nécessairement le type de stimuli ou d'environnement réel sur lequel agit l'opérateur.

Durant l'utilisation d'outils manuels, la force de saisie peut changer rapidement, et l'impédance de l'environnement peut être non-linéaire. En plus, si on désire étudier la perception proprio-tactilo-kinesthésique durant la manipulation directe, l'apport de la perception tactile seul peut être important à étudier.

Quelques chercheurs se sont intéressés à l'étude d'environnements plus complexes, en s'appuyant sur une approche plus structurée dans leurs expériences. Notamment, Lederman et Klatzky [Led90] ont réalisé une étude où ils ont montré que les sujets ont du mal à reconnaitre de manière systématique les dessins à main levée d'objets communs en utilisant le toucher, par contre ils peuvent reconnaître facilement des objets 3D familiers comme un stylo [Kla85].

Klatzky et Lederman [Kla89] ont proposé que "le système perceptuel tactilo-kinesthésique utilise des stéréotypes", qu'ils appellent "procédure d'exploration". Une procédure d'exploration est un modèle de déplacement qui est adapté à la sensation d'une des propriétés d'un objet. Par exemple, ils ont trouvé que le déplacement latéral (frotter une surface) est utile pour déterminer une texture, la pression pour déterminer la dureté, la douleur pour le poids des objets, et le suivi de contour pour déterminer la forme précise des objets. Dans les expériences de Klatzky et Lederman, les sujets peuvent explorer l'objet avec toute leur main. Dans les tâches de reconnaissance d'objets, le sujet utilise probablement une procédure d'exploration multiple pour chaque objet.

D'autres recherches se sont intéressées à la perception de l'environnement avec un outil. Chan et Turvey [Cha91] ont étudié l'habileté du sujet à percevoir la position d'une surface horizontale à l'aide d'une sonde maintenue par la main. Barac-Cikoja et Turvey [Bar91] ont examiné la perception de la distance entre deux objets à l'aide d'une tige placée entre les deux.

Kontarinis et Howe [Kon95] ont étudié la perception des vibrations haute fréquence transmises à la main par un outil durant la manipulation. Dans les tests de laboratoire, ils ont montré que les performances lors de tâches de télemanipulation, incluant l'assemblage, le repérage, et le perçage, s'améliorent lorsqu'il y a un retour vibratoire en plus du retour de force. Le système de retour vibratoire utilisé est constitué d'un capteur de vibration

(accéléromètre) sur la pince du robot esclave, un amplificateur haute fréquence de courant, et un haut parleur modifié placé sur le manche ou sur l'extrémité du manipulateur maître, fournissant ainsi à l'utilisateur une bonne perception des textures et des autres constituants fins d'une surface, ce qui permet d'enrichir la perception d'événements non-permanents comme le contact dur ou le perçage.

James J.Gibson a développé deux concepts importants auxquels on peut se référer pour envisager la perception tactilo-kinesthésique : la notion de système perceptuel, et l'utilisation de la théorie de l'information.

Gibson a décrit le système perceptuel comme un système organisé hiérarchiquement, qui s'active en présence de stimulations [Gib62]. Pour Gibson, l'idée de système de perception s'oppose au concept de sensibilité, qui produit des sensations brutes traitées et intégrées quelque part par le cerveau pour produire une perception. Gibson a montré que le système de perception pour la vision ne comprend pas uniquement les yeux, mais aussi le déplacement de la tête et du corps. Le système visuel entier coopère pour détecter une structure, un modèle, une texture, une configuration, avec la quantité de lumière disponible dans l'environnement.

L'action du système visuel inclut l'ajustement de l'accommodation, l'intensité de la modulation, l'adaptation au noir, les mouvements de fixation et de capture ainsi que les mouvements de la tête et du corps. Tout ceci aide à trouver des structures dans la lumière ambiante, fournissant des informations spécifiques sur l'environnement. Sans structures, l'environnement ne peut être spécifié et par conséquent il n'y aura pas d'informations perceptibles disponibles.

Le concept de système perceptuel et la capture d'information constituent le fondement de la théorie de Gibson sur la perception.

Les procédures d'explorations décrits par Klatzky et Lederman [Kla85] sont équivalentes dans les termes de Gibson à une action pour la capture d'informations par le système perceptuel tactilo-kinesthésique. La pression, la dureté et le poids sont spécifiés par la caractéristique de la stimulation produite, quand l'objet est saisi d'une certaine manière.

Un autre travail qui s'est inspiré de celui de Gibson est celui de Millman [Mil95], qui a étudié différentes structures d'environnements mécaniques non-linéaires. Ces environnements étaient perçus à travers un système à retour d'effort à 1 DDL rotatif. Millman a remarqué que lors de l'utilisation d'un instrument, son déplacement et sa résistance (position et force générée par celui-ci) peuvent être considérés comme les stimuli de base susceptibles d'être structurés de différentes manières, sous certaines conditions d'exploration motrice, pour déterminer les caractéristiques de l'environnement.

Dans notre cas, les interactions entre l'opérateur et l'environnement avec lequel il interagit sont basées sur l'utilisation des modèles physiques *(cf. Annexe C)*. Un système mécanique est un ensemble de masses et de liaisons viscoélastiques, dont la configuration spécifie la nature de l'environnement, et la fonction non-linéaire liant la force au déplacement spécifie la nature de l'interaction.

2.4. Effet de la dynamique du manipulateur sur les mouvements de la main

D'autres travaux se sont intéressés à l'influence de l'impédance linéaire d'un manche de contrôle sur la vitesse et la précision avec laquelle les personnes peuvent le déplacer. La plupart de ces études utilisent le retour visuel pour essayer d'atteindre une cible qui change continuellement et aléatoirement de position. Dans ce qui suit, on décrira certains de ces travaux.

Jones et Hunter [Jon90] ont conduit des expériences dans lesquelles les sujets suivent un stimulus d'entrée qui varie de manière aléatoire à chaque seconde. La "taches" est analogue à une tâche de recherche et de saisie d'un objet sous le contrôle visuel. Jones et coll. ont fait varier la raideur de l'outil de contrôle de 0 N/m à 2000 N/m pour mesurer son influence sur la vitesse et la précision du suivi. Ils ont aussi mesuré les performances des sujets quand la sortie commandée est la force appliquée sur le stick et non la position lorsque le stick est très rigide.

La sortie est analysée en termes de théorie du contrôle et est utilisée pour estimer la réponse impulsionnelle de l'opérateur humain. Le résultat observé est que la réponse du sujet est plus rapide pour les grandes raideurs du manipulateur, mais elle est plus précise pour les faibles raideurs. En particulier, le délai pur dans la réponse de l'opérateur décroît avec l'augmentation de la raideur.

Dans d'autres expériences le sujet doit positionner ou déplacer avec précision un stick en utilisant uniquement l'information proprio-tactilo-kinesthésique, plutôt que l'information visuelle. Dans une expérience de Weiss [Wei54], les sujets ont essayé de positionner un stick ayant une certaine raideur, en fournissant un retour visuel uniquement à la fin de chaque essai. Le résultat observé est que l'erreur de positionnement décroît en fonction de la distance totale du mouvement. Par contre, la variation de la raideur (force) n'a pas d'effet sur la précision.

Dans une expérience similaire, Bahrick, Fitts et Schneider [Bah55] demandent aux sujets de déplacer un bâton en suivant une trajectoire triangulaire et circulaire avec différentes raideurs, amortissements et inerties. Pour des valeurs d'amortissement et d'inertie assez grandes, on obtient des mouvements à vitesse uniforme (uniformité dans le mouvement lui même et entre différents mouvements). Les différentes conditions d'initialisation n'influent pas significativement sur la précision spatiale des mouvements. Les effets observés de l'amortissement et de l'inertie sont probablement dus à la vitesse tangentielle qui est moins sensible aux forces appliquées dans les conditions de l'expérience, plutôt qu'au recourt aux informations proprioceptives.

Ces trois études ont montré que les forces associées à une impédance linéaire fournissent de faibles perceptions tactilo-kinesthésiques, qui n'améliorent pas la précision de positionnement et ceci est dû à la faible impédance du bâton.

3. Les fonctions ergotique et sémiotique

C. Cadoz distingue ces deux fonctions du canal gestuel afin de bien séparer les aspects énergétiques et les aspects informationnels des interactions de l'homme avec son environnement. Il existe en effet des actions qui n'ont aucune finalité communicationnelle, comme par exemple enfoncer un clou dans un mur à l'aide d'un marteau, dans le but d'installer un crochet pour accrocher un ustensile. Les mêmes actions peuvent cependant avoir un but communicationnel : effectuer l'opération précédente à une heure avancée de la nuit dans le but (inavoué) d'empêcher ses voisins de dormir.

Dans les deux cas, l'activité motrice est en jeu. Dans le premier, l'opération doit être menée avec une certaine dextérité afin que l'objectif matériel soit atteint. Un critère quantitatif important pour la caractériser est alors la dépense d'énergie (la fatigue). Dans le second cas, la dépense d'énergie peut être aussi importante, mais le but peut être atteint même si l'on tape à côté du clou. La réussite de l'opération se manifeste d'une autre manière : comme dans tout processus communicationnel, par une quelconque réponse ou manifestation plus ou moins différée.

Dans le cas de la fonction ergotique, la dépense ou l'échange d'énergie sont nécessaires et non négligeables. Dans le cas de la fonction sémiotique, l'échange d'énergie peut avoir lieu, mais il n'est pas nécessaire, ou en tout cas, il peut être très faible.

3.1. Mouvement dirigé de la main

L'homme est sollicité, dans sa vie courante, professionnelle ou autre, par des tâches d'une extrême diversité. Leur réalisation nécessite souvent l'exécution de mouvements. Chacun de ces mouvements s'exprime par la mise en jeu harmonieuse d'un certain nombre de segments corporels. L'action motrice est organisée en vue de la réalisation d'une tâche déterminée, c'est-à-dire d'un *mouvement dirigé*, qui est dit *efficace* dans la mesure où le but recherché est effectivement atteint.

Un domaine d'étude concernant le contrôle moteur humain est celui des mouvements dirigés. Ces études impliquent généralement les mouvements de la main, ou de quelques articulations, d'une position de départ à une position cible qui est visible avant et pendant le mouvement. On présume que les sujets ont le temps de planifier, ou au moins prévoir une trajectoire initiale.

Dans le cadre de l'étude des mouvements, la réalisation de tâches alternatives et la mesure des performances ont été réalisées pour déterminer le lien entre la vitesse et la précision. Différents objectifs spatio-temporels peuvent spécifier la tâche. Par exemple, on peut demander au sujet de se déplacer d'une position initiale à une position cible, s'arrêtant le plus prêt possible de la cible, ou bien on peut lui demander simplement de s'arrêter n'importe où dans l'environnement de la cible. On peut aussi demander au sujet de se déplacer en un temps spécifique : mouvement à contrainte temporelle (time-matching movement task), ou de se déplacer le plus lentement possible avec une certaine précision : mouvement à contrainte

spatiale (time-minimization task). Le mouvement peut être réalisé à répétition, avant, arrière, entre deux cibles (capture réciproque).

Le temps et la position exacts de déclenchement sont contrôlés avec précision pour des mouvements simples (uniformes) plutôt que pour des mouvements réciproques (composés), d'où des mesures plus précises de la durée et de la distance du mouvement. Dans les mouvements réciproques, l'hésitation entre le mouvement et le changement de position initial (erreur dans la position d'arrêt précédente) peut introduire des difficultés dans la mesure de la performance.

Plusieurs types de mesures de performance sont communément utilisés pour quantifier le degré avec lequel le mouvement atteint son but spatial et temporel [Mey90]. En notant la valeur de la cible x* (position ou durée), l'erreur absolue (EA) est définie comme la moyenne des erreurs (différence entre la position de la cible initiale ou le temps initial et la position d'arrêt ou temps d'arrêt actuel) à travers n essais.

$$EA = \sum_{i=1}^{n} \left| x_i - x^* \right| / n$$

L'*erreur absolue* moyenne est une bonne mesure de la précision générale. L'erreur peut être aussi représentée par un terme constant et un terme variable. L'erreur constante (EC) est la différence entre la valeur de la cible et la position ou le temps moyen d'arrêt ($\bar{x}$).

$$EC = \bar{x} - x^*$$

Cette mesure indique si l'erreur est biaisée d'un côté ou de l'autre de la cible. Une mesure de la distribution de l'erreur autour de l'erreur moyenne représente l'erreur variable (EV), qui est la déviation standard de la position ou temps d'arrêt autour de sa moyenne.

$$EV = \left[\sum_{i=1}^{n} \frac{(x_i - \bar{x})^2}{(n-1)} \right]^{1/2}.$$

Par exemple, si le but spatial de la tâche est d'atteindre une bande de largeur finie, la précision peut être aussi mesurée en termes de pourcentage de réussite d'atteinte de la cible. Cette mesure, comme celle de l'erreur absolue, est bien pratique par sa simplicité, mais introduit de fausses interprétations, si on considère uniquement la mesure de l'erreur systématique.

Après avoir présenté une approche globale des protocoles et fiabilités des mesures utilisées dans l'étude des mouvements dirigés, nous allons décrire quelques études qui se sont intéressées à ce domaine.

L'étude des mouvements dirigés a commencé vers 1899 avec les travaux de R.S.Woodworth [Woo49]. Woodworth a étudié la manière avec laquelle la vitesse influence la précision. Le sujet essaie répétitivement de tracer des lignes de longueur spécifique en se synchronisant avec un métronome (tâche de correspondance temporelle). Les lignes sont tracées à travers une fente dans une table pendant le défilement d'un rouleau de papier. Les fréquences du mouvement varient de 20 à 200 mouvements par minute. Woodworth a réalisé la même

expérience avec des sujets aux yeux bandés. La précision est mesurée en termes d'erreur absolue moyenne. Le résultat trouvé est que l'erreur absolue moyenne augmente approximativement linéairement avec une vitesse moyenne de mouvement lorsque les yeux sont bandés. Ce résultat a permis à Woodworth de donner une hypothèse sur l'existence de deux phases distinctes dans les mouvements dirigés : une phase d'ajustement initial, qui est un déplacement pré-planifié (boucle ouverte) vers la cible, et une phase de contrôle continu qui implique le guidage du membre vers la cible en utilisant un retour sensoriel (i.e. contrôle en boucle fermée).

Une des études les plus originales et la plus souvent citée a été réalisée par Fitts en 1950 [Fit54]. Fitts demandait aux sujets de déplacer manuellement un bâtonnet en avant et en arrière, et de toucher avec ce bâtonnet une bande cible sur une plate-forme métallique. Les sujets devaient toucher la cible le plus lentement possible sans la rater, en avantageant la précision à la vitesse. Les sujets réalisaient la tâche avec des bâtonnets de 30 gr. et de 450 gr. On fait varier systématiquement la distance entre les cibles D, et la largeur de la cible L . Le taux d'erreurs et le temps moyen du mouvement TM sont enregistrés pour chaque condition d'exécution de la tâche.

Fitts a formalisé ses résultats dans une relation empirique connue sous le nom de "loi de Fitts" :

$$TM = c_1 + c_2 . \log_2 (\frac{2.D}{L})$$

Où c_1, c_2 sont des constantes, le terme en logarithme représente l'index de difficulté.

Fitts a conduit deux autres expériences similaires [Fit54]. Dans l'une, les sujets transfèrent des rondelles d'un support à un autre. La distance entre les deux supports représente l'amplitude de la tâche D, et la différence de diamètre entre le support et le diamètre du trou de la rondelle représente la tolérance de la tâche, L.

Dans l'autre expérience, les sujets déplacent une rangée de piquets se trouvant dans des trous sur une planche vers une autre planche. Le résultat de ces expériences vérifie bien la loi de Fitts.

Le variation logarithmique de la précision de la vitesse caractérisée par la loi de Fitts a été validée au départ empiriquement pour différentes articulations humaines (doigts, poignet, coude ...), pour différents dispositifs expérimentaux, selon l'âge des sujets et les conditions de l'environnement [Mey90]. Plusieurs chercheurs ont critiqué l'utilisation de la théorie de l'information comme base théorique pour l'interprétation des résultats expérimentaux et ont proposé des modifications à la loi de Fitts [Mey90].

Crossman et Goodeve ont proposé un modèle déterministe de correction itérative pour expliquer la loi de Fitts [Cro83]. Notons aussi que la plupart des mouvements dirigés ne sont pas effectués d'une manière continue et précise, mais apparaissent comme un ensemble de sous-mouvements discrets (i.e. la vitesse de déplacement diminue et augmente successivement). D'après Crossman et Goodeve, les sous-mouvements sont produits par la correction du retour visuel. Ils ont essayé d'expliquer la variation logarithmique en termes

déterministes du contrôle rétroactif seul. Ils ont rejeté l'existence d'une phase d'ajustement ou d'un bruit quelconque. Le modèle souffrait de sérieuses imperfections. Plusieurs de leurs suppositions et prédictions ne concordent pas avec les observations empiriques.

Une autre loi empirique relative à la vitesse et à la précision dans des tâches pour lesquelles on cherche à augmenter la précision de l'exécution ("time-matching movement task") représente une loi de puissance, de la forme :

$$MT = c_1 + c_2.(\frac{D}{L})^p$$

Où c_1 et c_2 sont des constantes et p une valeur entre 0 et 1.

Kvalseth [Kva80] et Meyer [Mey90] ont trouvé que la loi de puissance décrit souvent les données temporelles des mouvements mieux que la loi de Fitts. Les valeurs de p obtenues pour les performances optimales sont souvent comprises entre 0,25 et 0,5.

Le contrôle possible du déplacement de la main vers une cible dépend de la vitesse du déplacement et de la durée des informations visuelles disponibles. Beaubaton [Bea83] a bien montré la difficulté de corriger un mouvement dont la durée est inférieure à 150 ms ainsi que le rôle joué par la vision pendant la phase terminale. Par exemple, les performances de pointage, mauvaises sans vision, s'améliorent dès que la vision intervient et deviennent précises quand la vision centrale guide la fin du geste. Il a montré aussi que la précision finale du mouvement, dépendant de la trajectoire initiale de la main, est plutôt indépendante du temps d'exécution. Par contre, l'erreur de pointage est variable et est très liée à la durée de l'activité motrice.

Un autre modèle pour ce type de tâche (déplacement de la main pour atteindre une cible), basé, non pas sur le déplacement balistique éventuellement corrigé par la vision en phase terminale, mais sur un déplacement saccadé ("impulse variability model") a été proposé par Schmidt et coll. [Sch79] pour mettre en évidence la linéarité de relation entre la vitesse et la précision observée dans les tâches de pointage pour lesquelles on cherche le maximum de précision ("time-minimization task"). Dans le modèle à *saccades variables,* la trajectoire du mouvement est déterminée par une succession de saccades, avec une force d'accélération impulsionnelle au début du mouvement et une décélération à la fin du mouvement. La trajectoire est déterminée par l'amplitude et la durée des impulsions. Le bruit dans ces paramètres explique la variation de la précision du pointage.

Le modèle par saccades variables est en complète opposition avec le modèle purement balistique car ce dernier ne contient pas de mécanisme de retour d'information. C'est pourquoi le modèle par saccades est plus adapté aux tests de comportements sur des cibles mobiles. Cependant, comme le modèle de correction itérative, il souffre de sérieuses imperfections : l'organisation des sous-mouvements reste inexpliquée, comme l'effet positif du retour visuel.

Un modèle stochastique optimisé de sous-mouvements développé par Meyer [Mey90] essaye d'expliquer la variation linéaire vitesse-précision pour les tâches "minimisation de temps" et la variation logarithmique dans les tâches "maximisation de la précision" en étudiant le

contrôle simultané en boucle fermée et en boucle ouverte. Dans Ce modèle, chaque sous-mouvement dans le mouvement général est affecté d'un bruit moteur proportionnel à la vitesse moyenne des sous-mouvements. Ce bruit peut faire que le premier sous-mouvement rate la cible, forçant ainsi le sujet à effectuer un second (ou 3ième ou niéme) sous-mouvement basé sur les retours sensoriels.

Ce modèle admet aussi que la variation vitesse-précision observée est linéaire dans les tâches "maximisation de la précision" pour chaque sous-mouvement, et considère que dans les tâches de "minimisation de temps", la stratégie consiste à contrôler la fréquence des saccades pour atteindre la cible par optimisation (minimisation) du temps du mouvement global. Si deux sous-mouvements sont considérés, le modèle dual de sous-mouvement optimisé en temps est défini par :

$$MT = c_1 + c_2 \cdot \sqrt{\frac{D}{L}}$$

Cette formulation du modèle optimisé de sous-mouvements concorde bien avec les données empiriques, et toutes les caractéristiques de base des mouvements dirigés sont expliquées par ce modèle.

Les questions de Woodworth [Woo49] sur la vitesse et la précision des mouvements viennent de l'observation des sculpteurs italiens martelant par l'intermédiaire d'un burin en ayant en même temps un mouvement précis et rapide. Aussi, la tâche expérimentale qu'il avait conduite pour étudier les mouvements ne correspond probablement pas bien avec l'action de marteler, action caractérisée par une phase de décélération très rapide. L'intérêt initial dans les études de Woodworth était l'utilisation des outils manuels.

Dans nos expériences, nous allons observer l'influence des paramètres de l'environnement sur la vitesse et la précision du mouvement dans des tâches de positionnement, de saisie, etc., à travers des environnements synthétiques simples et complexes[1].

3.2 Classification de la fonction sémiotique

Plusieurs travaux se sont intéressés à caractériser le geste sémiotique [Mul96] [Rim91][Cad94b]. Le geste sémiotique peut être décomposé en quatre catégories :

- *Le geste symbolique* : ce type de geste dépend de la culture, et possède une signification dans un contexte culturel bien déterminé. Le langage des signes est un exemple significatif. Dans la littérature, certains le nomme aussi "geste langagier" [Fol90].

- *Le geste déictique* : Un exemple usuel de ce type de geste est le geste de pointage, où l'attention de l'utilisateur est dirigée vers un événement ou objet spécifique. La plupart des gestes effectués sur une interface d'ordinateur aujourd'hui, sont de ce type. De

[1]La complexité de l'environnement est déterminée par la nature de la fonction d'interaction entre les différents objets.

telles gestes ont été implantées par Pook [Poo95] dans la commande d'un bras de robot à l'aide d'un exosquelette [Pat90], et par Baudel [Bau93] dans la commande d'un rétroprojecteur en utilisant un gant de données (VPL)[Fol87].

- *Le geste iconique* : c'est le type de geste utilisé pour informer sur la taille, la forme ou l'orientation d'un objet. Ce geste se trouve souvent lié à la parole.
- *Le geste pantomimique* : il mime le comportement d'un instrument ou d'un objet.

MacNeil [Mac92] introduit une autre composante au geste iconique :

- *Le geste métaphorique* : il s'agit de gestes iconiques relatifs à des choses abstraites.

4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié les différentes possibilités de communication du geste manuel et les différentes propriétés qui lui sont associées dans différentes études précédentes. Nous avons vu que les stimuli qui peuvent influencer la perception gestuelle sont la raideur, la viscosité, l'inertie et les vibrations.

Nous avons montré les propriétés actionnelles du geste permettant ainsi à l'utilisateur de modifier son environnement, mais aussi de percevoir cette modification, d'où l'importance de la corrélation action-perception gestuelle ou l'importance du "geste ergotico-épistémique" dans la communication Homme-Machine mettant en œuvre des objets virtuels. Pour un musicien ou un sculpteur, c'est un geste fondamental lui permettant d'exprimer toute sa virtuosité.

Dans le chapitre qui suit nous allons proposer une typologie des tâches sensori-motrices que l'opérateur humain réalise à travers un instrument, réel ou non, et une manière de caractériser de telles tâches.

Chapitre 4

ÉLÉMENTS de Typologie des tâches instrumentales humaines

Ayant défini précédemment les notions de situations, tâches et gestes instrumentaux, le but de ce chapitre est à présent de déterminer une typologie des tâches instrumentales de base et d'étudier les caractéristiques gestuelles et matérielles de chacune d'elles. L'objectif d'une telle étude est la caractérisation de l'ensemble des constituants d'une tâche instrumentale pour aider à sa mise en œuvre dans un contexte informatique. Les rôles que l'ordinateur pourra jouer sont alors nombreux. Il peut servir :

- soit comme un outil d'étude complémentaire des tâches elles-mêmes, par le prototypage d'instruments réels nouveaux ou de méthodes opératoires nouvelles,

- soit comme un outil d'apprentissage via la réalisation de simulateurs,

- soit comme un constituant matériel de l'outil d'exécution de la tâche, comme c'est le cas dans des situations de téléopération.

Pour montrer et tester l'usage de cette étude, nous avons commencé à implémenter un simulateur d'opération chirurgicale. Il sera décrit au chapitre "Applications". L'objectif premier de ce simulateur dans notre thèse est de se présenter comme un outil de caractérisation de la tâche elle-même, avant un usage de l'ordinateur dans le processus chirurgical effectif ou dans son apprentissage.

A partir des études effectuées aux chapitres précédents et des observations des tâches courantes, nous avons déterminé une première catégorie de tâches, classées par ordre de difficulté croissante, que nous appelons *'les tâches principales'*. Une seconde catégorie de tâches plus particulières où l'intervention de plusieurs acteurs est nécessaire, représente *'les tâches assistées'*.

Les tâches instrumentales de base que nous avons déterminées sont au nombre de quatre : la tâche de positionnement, la tâche de saisie, la tâche de déplacement et la tâche d'assemblage. Les tâches instrumentales assistées sont au nombre de trois : tâche de coopération instrumentale entre deux opérateurs, tâches téléopérées, conduite d'un objet mobile ou motorisé.

Chacune de ces tâches est caractérisée par quatre critères:

- *l'environnement de travail* (dimensions, type de complexité),
- *les caractéristiques de l'objet* manipulé (sa forme, ses dimensions),
- *Les caractéristiques de l'opérateur* (les modalités sensori-motrices utilisées)
- et enfin *les conditions de réalisation de la tâche* (ses contraintes).

Dans ce qui suit nous étudions chaque critère et définissons les paramètres les décrivant. Nous décrirons ensuite quelques tâches exemplaires.

La caractérisation de tâches a déjà été réalisée dans plusieurs domaines, en particulier dans le domaine sportif [Fam90] et dans le domaine de la communication homme-machine [Sca89]. La particularité de notre taxonomie est qu'elle prend en compte toutes les entités intervenant pour la réalisation de la tâche sensori-motrice .

Dans l'exécution d'une tâche instrumentale, nous pouvons distinguer trois types d'entités matérielles qui contraignent son exécution : l'environnement, l'instrument manipulé par l'homme, l'objet manipulé par l'instrument.

Dans l'univers réel, les deux derniers peuvent être confondus lorsque l'homme manipule directement l'objet réel sans instrument intermédiaire. Dans ce cas l'objet est simultanément "objet" et "instrument". C'est ce cas que nous abordons dans ce chapitre.

Le cas où l'instrument (respectivement l'objet) se décompose en partie manipulée par l'homme et partie manipulée par l'instrument sera traité au chapitre suivant. En particulier, lorsque l'homme exécute une tâche à l'aide d'un ordinateur (apprentissage sur simulateurs, tâches téléopérées, aide à la décision ...), la manipulation des objets intervenant dans la tâche nécessite l'utilisation d'outils intermédiaires de manipulation (souris, systèmes gestuels à retour d'effort ...), et ceci même pour des tâches de manipulation directe d'objet (positionnement, saisie directe ...).

1. Caractérisation de l'environnement

L'environnement représente le contexte dans lequel évolue l'objet manipulé sous l'action d'un opérateur, via un instrument ou non. Cet environnement est caractérisé par les paramètres suivants :

Paramètres dynamiques

- *Gravité* : la gravité peut avoir un rôle non négligeable sur la nature et la menée de la tâche.
- *Viscosité* : un environnement peut être aussi caractérisé par sa viscosité. Une tâche implique des efforts différents selon qu'elle est réalisée dans le vide ou dans un milieu très visqueux.

Paramètres géométriques

- *Dimension* : Dans la caractérisation de l'environnement on ne tient pas compte des dimensions du dispositif. L'environnement a au maximum trois dimensions alors qu'un dispositif peut atteindre un nombre de degrés de libertés beaucoup plus important (101 dimensions pour le clavier alphanumériques à 101 touches, 88 pour le piano, etc.).
- *Borné /Non-borné* : un environnement borné a des limites bien déterminées, à l'extérieur desquelles la tâche ne peut être réalisée. Tout environnement connu est à priori borné. Dans les environnements non-bornés, les positions finales des objets servant à exécuter la tâche sont généralement relatives.
- *Contraint* : L'environnement impose des contraintes à la manipulation (contraintes de déplacements, de vitesse ...), par exemple, lorsque l'opérateur aura besoin de contourner des obstacles pour atteindre un objectif.
- *Isotrope/Anisotrope* : un environnement isotrope a les mêmes caractéristiques dans toutes les directions. Un environnement avec de la gravité ou des obstacles n'est pas isotrope.

Remarques : un environnement 1D ne peut pas contenir d'obstacles. Il est forcément isotrope. Bien évidemment, les caractéristiques de l'environnement influent sur la complexité de la tâche.

2. Caractérisation de l'objet manipulé

A part les tâches de positionnement ou de pointage, toutes les tâches s'effectuent sur des objets. Nous examinons ici le cas de tâches dans lesquelles l'objet est manipulé directement

par l'homme sans aucun autre intermédiaire instrumental. Un objet est caractérisé par les paramètres suivants :

Propriétés géométriques

- *Isotrope-Anisotrope* : un objet isotrope à la même forme dans toutes les directions. Une sphère homogène est un objet isotrope. L'objet isotrope le plus simple est un point.
- *Homogène* : un objet homogène est constitué de la même matière dans sa globalité. La différence entre un objet isotrope et un objet homogène est la suivante : le premier possède les mêmes caractéristiques physiques et géométriques dans n'importe quelle direction et le deuxième ne conserve que les propriétés physiques.
- *Localisation* : position de l'objet dans son environnement.
- *Dimensions* : caractéristiques géométriques, largeur, hauteur, longueur, forme simple ou composée. L'objet matériel le plus simple peut être défini par une masse ponctuelle sans dimension.
- *Articulé* : s'il s'agit d'un objet lui même constitué de plusieurs objets liés mécaniquement par des articulations ou des guidages (par exemple, des ciseaux).

Propriétés dynamiques

- *Inertie* : Chaque objet est caractérisé par une inertie dont va dépendre l'effort à fournir pour le déplacer.
- *Raideur* : La raideur caractérise la dureté de l'objet et la déformation que nous pouvons lui appliquer sans le rompre.
- *Viscosité* : la viscosité va nous permettre de caractériser la consistance de l'objet, la viscosité comme la raideur est une propriété physique qui caractérise la déformation de l'objet.

Propriétés Motrices

- *Autonome* : un objet autonome est un objet qui peut se déplacer ou se déformer de lui même, qui possède donc sa propre énergie, mais qui de plus, possède une capacité décisionnelle et des fonctionnalités intentionnelles propres.
- *Semi-autonome* : Un objet semi-autonome est un objet muni d'une certaine autonomie motrice (il peut se déplacer sans l'apport d'énergie externe), mais n'a pas d'intentionnalité propre. Il exige l'intervention de l'homme (ou d'un être doué d'autonomie) pour certains actes.
- *Passif* : un objet passif ne peut pas changer d'état sans énergie fournie par une source extérieure. L'objet peut être fixe : il ne change pas de position au court du temps. Il y a

une différence entre autonome (ou semi-autonome) et mobile : les premiers possèdent une source d'énergie interne, les seconds n'en possèdent pas.

Les caractéristiques de l'objet, comme les caractéristiques de l'environnement conditionnent la complexité de la tâche.

3. Caractérisation de l'opérateur

L'opérateur est évidemment le maillon le plus important dans la réalisation d'une tâche instrumentale quelconque dans un environnement défini. L'opérateur possède des organes d'actions et de perceptions lui permettant d'agir sur les objets. Suivant la tâche à réaliser et les conditions de celle-ci (environnement et objet), l'opérateur choisira les organes sensoriels et les effecteurs appropriés.

Organe d'action :

Pour agir sur l'environnement, l'opérateur a recours à une partie de son corps (main, doigt, jambe, bras, une combinaison de membres, ...). Pour des tâches complexes, il utilisera la combinaison des différentes articulations de ses mains, de ses bras et de ses épaules pour suivre une trajectoire bien déterminée. Chaque organe est caractérisé par une portée d'action maximale, dont il faut tenir compte lors de la réalisation de la tâche.

- *Force maximale* : chaque organe développe une force maximale qu'il ne peut pas dépasser.
- *Amplitude maximale* : chaque organe a une portée maximale dans l'espace qui l'entoure, en ne considérant pas la locomotion.
- *Vitesse* maximale: vitesse de réaction pouvant être atteinte par l'organe d'action.

Organe de perception :

Dans notre étude, il s'agit soit de la vision, de l'ouïe ou de la perception proprio-tactilo-kinesthésique. Les organes de perception permettent à l'opérateur d'évaluer la tâche par rapport au but fixé. Chaque organe possède des caractéristiques perceptibles propres de type spatial et de type temporel.

- *Limitation spatiale* : elle est relative à la sensibilité de l'organe utilisé : chaque organe ne perçoit plus rien à une certaine distance du stimulus.
- *Limitation temporelle* : une stimulation doit persister un certain temps pour être perçue, mais ce temps ne doit pas non plus dépasser un temps maximal au delà duquel l'opérateur pourra devenir insensible à de telles excitations.

La vision est limitée par son champ et la distance. L'ouïe est limitée par la distance et la fréquence. La proprio-tactilo-kinesthésie est efficace pour certaines valeurs de pressions et de grandeurs géométriques.

Le contrôle possible du déplacement de la main vers une cible dépend de la vitesse du déplacement et de la durée des informations visuelles disponibles.

4. Caractérisation de quelques tâches

Dans les sections précédentes, nous avons caractérisé les différents constituants qui interviennent dans la réalisation d'une tâche instrumentale de manipulation directe. Dans la section suivante, nous allons essayer de caractériser quelques tâches par leur ordre croissant de difficulté objective. Caractériser la tâche revient à définir ses conditions initiales et ses conditions finales. Plus exactement , cela revient à déterminer le but à atteindre à partir d'une situation donnée.

4.1. Conditions de réalisation de la tâche

Pour caractériser les conditions d'une tâche instrumentale, nous avons défini les paramètres ci dessous :

- *État initial* : Il est caractérisé par un ensemble de variables d'état représentant l'état initial de l'objet sur lequel nous agissons, sachant que nous n'étudions que les tâches actionnelles et non les tâches langagières. L'état initial de la main n'est pas un critère important, puisque l'état de la main n'est intéressant que lorsqu'elle agit sur un objet. Une des variables d'état est couramment la position des objets. Celle-ci peut être *absolue* ou *relative*. Elle est absolue lorsque le repère est fixe, relative lorsque celui-ci est mobile. Par exemple, dans une tâche d'assemblage où les deux objets sont mobiles, les positions initiales et finales sont les positions relatives des deux objets l'un par rapport à l'autre. Une position se définit donc par <x, y, z, A (bsolue) ou R(elatif)>. D'autres variables d'état peuvent être considérées de la même manière (vitesse, accélération des objets...)

- *État final* : il est défini par les valeurs des variables d'état de l'objet lorsque la tâche est accomplie. La encore, la position finale relative ou absolue de l'objet est un critère fréquent <x, y, z, A ou R>.

- *Précision* : Elle est relative aux variables d'état finales. Par exemple, dans une tâche de positionnement, elle indiquera la précision de la position finale de l'objet à positionner

- *Vitesse* : représente la rapidité avec laquelle la tâche est réalisée. Elle dépend de la contrainte sur la durée de réalisation de la tâche.

4.2. Les opérateurs sur les tâches

Une tâche sensori-motrice peut être décomposable en sous tâches qui peuvent être successives ou simultanées. Nous avons donc défini deux opérateurs sur les tâches :

- *Séquentielles* : ce sont les tâches qui se succèdent dans le temps, auquel cas, on ne peut réaliser une deuxième sous-tâche que lorsque la précédente est terminée. Nous avons défini un opérateur noté (+) pour représenter la séquentialité.
- *Parallèle* : ce sont des tâches qui doivent se réaliser simultanément. Dans ce cas l'objectif n'est atteint que si les sous-tâches ont atteint leurs objectifs au même moment et seulement dans ces conditions. L'opérateur de mise en parallèle est noté *.

4.3. La tâche de positionnement

La tâche de positionnement est la tâche la plus simple que nous pouvons observer. Elle consiste à positionner la main à un emplacement particulier, là où se trouve par exemple l'objet à saisir.

Le positionnement est caractérisé par deux paramètres : la précision et la vitesse de réalisation.

La tâche de positionnement peut devenir complexe lorsqu'il s'agit d'un positionnement dynamique. Comme nous l'avons vu précédemment, le mouvement de la main semblerait s'exécuter soit par phases ou soit en contrôle continu. Dans les deux cas, cela laisse entendre que de nouveaux positionnements pourrait être imposés à la main sans délai au cours de sa tâche de positionnement spatial. L'information spatiale a un accès direct aux centres de contrôle du mouvement et les influence immédiatement.

D'après Rigal [Rig85], pour atteindre une position, l'opérateur met en interaction trois systèmes : une cible (position à atteindre) , l'œil et la main. Dans le cas de l'étude de la tâche de positionnement - saisie - déplacement - assemblage d'objets, la cible est l'objet à atteindre.

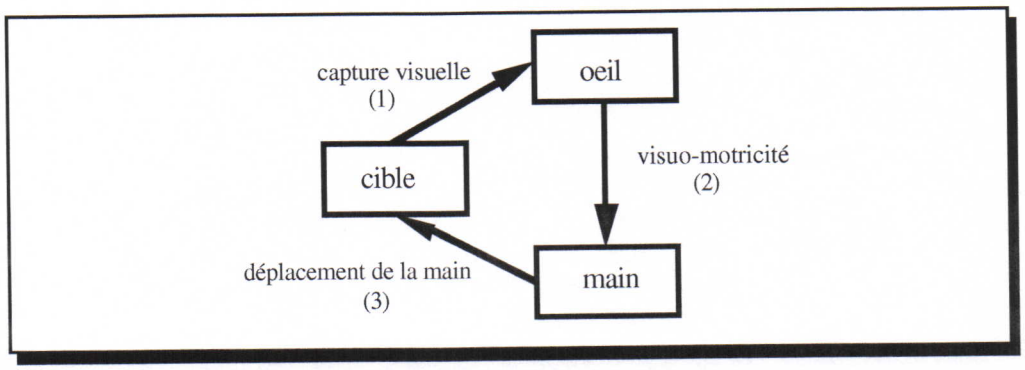


***Figure 4.1** : Étape de coordination visuo-manuelle pour atteindre un objet [Rig85]*

La première étape est la capture visuelle qui consiste à capter les informations issues de l'objet à atteindre. L'œil grâce à la *vision périphérique* va localiser l'objet, ensuite la vision centrale va le caractériser (distance, vitesse, direction, forme, intensité, couleur). Une fois l'objet localisé et ses caractéristiques déterminées, la visuo-motricité entre en jeu. Elle consiste d'abord en la programmation du déplacement de la main (direction, vitesse, distance, amplitude, force), puis en la réalisation effective du *déplacement de la main.* Celui-ci peut mettre en jeu un contrôle du déplacement en boucle ouverte (guidage visuel) ou en boucle fermée (feed-back somesthesique).

4.4. La tâche de saisie

Les tâches de saisie manuelle sont des tâches importantes pour l'opérateur humain, et il existe différentes manières de saisir un objet [Rig85]. Dans ce qui suit nous allons décrire les différentes étapes d'une tâche de saisie.

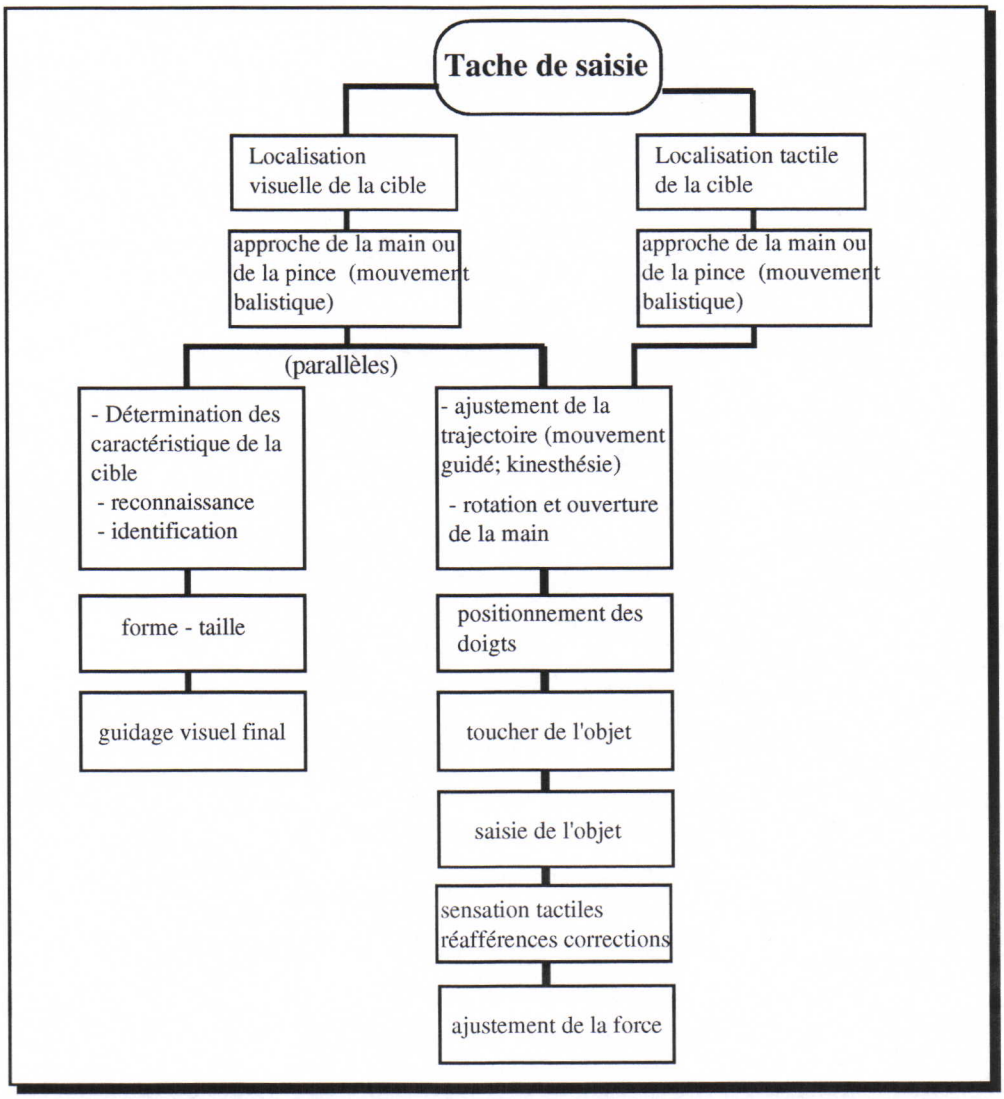


Figure 4.2 : *Étapes de la saisie manuelle d'un objet*

Une tâche de saisie peut être décomposée en quatre étapes principales :

1- Repérer l'objet (utilisation de la vision ou de la perception tactile).

2- Tendre le bras dans la direction de l'objet jusqu'à ce que la position de la main et de l'objet soit confondues (ou condition d'arrêt d'urgence en cas d'incident).

3- Refermer les doigts de la main ou l'instrument sur l'objet. Enfermer la cible dans sa main avec ses doigts (avec l'une des possibilités de saisie décrites dans le chapitre précédant, dépendant étroitement de la forme de l'objet).

4- Saisir l'objet en fournissant la force nécessaire pour le soulever.

Nous remarquons que les deux premières étapes de la tâche de saisie constituent la tâche de positionnement étudiée dans le paragraphe précédent.

La tâche de saisie proprement dite dépend étroitement de l'objet à saisir, sa taille mais également ses propriétés physiques connues ou supposées ainsi que toutes les caractéristiques de l'objet définies au *(§Chapitre 4.2)*. Ces caractéristiques influent d'ailleurs également dans la phase de positionnement de la main, lorsque celui-ci a comme objectif la saisie.

4.5. La tâche de déplacement :

Une tâche de saisie est souvent suivie d'une tâche de déplacement de l'objet saisi, qui peut être facile ou compliquée. Une tâche de déplacement sera facile dans le cas où la trajectoire est simple (pas d'obstacle, parcours libre) et où l'objet est simple (forme simple, objet non-articulé, etc.).

La tâche de déplacement se complexifie dans le cas d'environnements inconnus, d'une trajectoire contrainte, ou bien lorsque l'objet est déformable. Dans ce cas, l'opérateur doit doser de différentes manières les efforts au niveau des articulations (bras, main et doigts).

Elle se termine naturellement par le lâcher de l'objet. La question de l'articulation entre la phase de déplacement et la phase de lâcher n'est pas simple à traiter. Il est évident qu'elle met en œuvre un processus de coordination et de synchronisation de nature différente de ceux du positionnement et de la saisie. En particulier, la prise en compte de la physique de l'objet et de l'environnement sont des critères importants, au moins autant que la forme et la taille de l'objet. Le lâcher suppose par exemple de s'interroger sur la stabilité de l'objet dans son environnement au moment où on le lâche. On ne lâche pas de la même façon un objet fragile ou un objet robuste, un objet rigide ou un objet mou, sur une surface rugueuse ou glissante ...

4.6. La tâche d'assemblage

Une tâche d'assemblage peut se faire entre deux objets mobiles ou entre un objet fixe et un objets mobile. Dans le premier cas nous pouvons avoir deux actions parallèles, dans le second nous n'avons qu'une seule action.

Une tâche d'assemblage peut être vue comme la composition d'une tâche de positionnement suivie d'une tâche de saisie et de déplacement. Après quoi l'objet est placé d'une manière bien définie. L'objectif final est que les deux objets soient placés l'un par rapport à l'autre d'une manière bien particulière, des points spécifiques du premier objet devant être placés d'une façon bien déterminée par rapport à des points précis du second objet. Cette tâche d'assemblage peut être réalisée directement avec la main ou à travers un ou deux instruments.

4.7. Tâches téléopérées

Les tâches s'effectuant par le biais d'une télémanipulation sont celles qui nécessitent que l'environnement de l'opérateur ne soit pas celui dans lequel la tâche se réalise, soit pour des raisons d'inaccessibilité soit pour des raisons de dangerosité. Une tâche téléopérée se fait à travers un instrument maître dans l'environnement de l'opérateur, une machine de transmission et un manipulateur esclave. Les tâches téléopérées peuvent être des tâches parmi celles décrites dans les sections précédentes. Dans une tâche téléopérée, il peut y avoir un certain retard entre l'action de l'opérateur et la perception de son effet par ce dernier, retard dépendant de la distance entre les deux environnements, de la vitesse de transmission et de la quantité d'information à transmettre.

La télémanipulation peut demander l'intervention plus ou moins importante des organes de vision et de proprioception, selon la tâche à effectuer. Une tâche de télémanipulation se décompose en tâche de positionnement, de saisie, de déplacement ou d'assemblage selon l'objectif.

4.8. La tâche de conduite d'un mobile

Le guidage de véhicules ou de mobiles représente une tâche particulière. La spécificité est que ce n'est pas la manipulation qui est la source de la mobilité de l'objet. Selon le type de tâche nous trouvons trois types de mobiles : autonome, semi-autonome et téléopéré en fonction de l'intelligence embarquée sur le mobile. Dans le cas d'un véhicule semi-autonome se déplaçant sur un terrain inconnu, l'opérateur peut intervenir dans certains cas pour aider le véhicule à traverser un obstacle et ainsi atteindre son objectif. Cette tâche est une tâche de contrôle de déplacement.

4.9. Tâche de coopération instrumentale entre deux opérateurs

Certaines tâches peuvent exiger l'intervention de deux opérateurs, chacun réalisant une partie de l'objectif. Les actions des opérateurs se font en parallèles et l'objectif n'est atteint que lorsque chaque opérateur a réalisé la partie qui lui incombe. L'objectif peut être un positionnement, une saisie, un déplacement ou n'importe quelle autre tâche.

Un bel exemple de tâche de coopération instrumentale est celui des marteleurs de gros chaudrons en cuivre : 3 ou 4 marteleurs, donnent un ou plusieurs coups de marteau dans une

zone, puis saisissent ensemble le chaudron et le font tourner légèrement et ainsi de suite, sans parler, en rythme.

5. Le cadre pour l'étude d'une tâche

Dans ce qui précède nous avons déterminé chaque maillon intervenant dans l'accomplissement d'une tâche donnée. Pour la réalisation de la tâche, nous devons donc prendre en considération les caractéristiques de l'objet, de l'opérateur, de l'environnement, mais aussi des conditions spatiales, temporelles et la précision de la tâche.

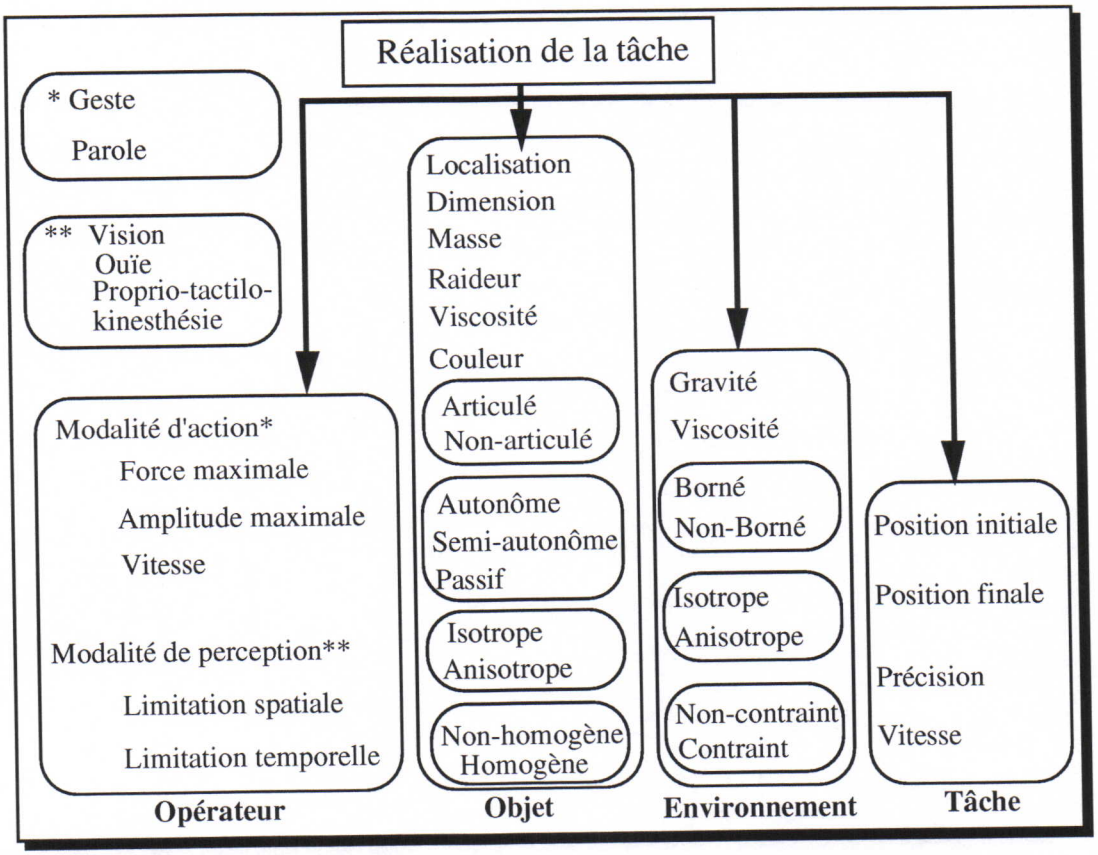


Figure 4.3 : *Cadre d'étude pour la caractérisation d'une tâche*

De la *figure 4.3*, nous avons défini les paramètres caractérisant une tâche. Ces paramètres permettent de savoir si la tâche est réalisable par l'opérateur, les modalités sensorielles qu'il doit utiliser suivant les propriétés de l'objet et de l'environnement.

Exemple

Supposons que la tâche consiste à assembler deux pièces mécaniques rigides, dont aucune n'est fixe, et posées sur une table vide.

a- Caractérisation de l'environnement

L'environnement est non-contraint, borné, possédant de la gravité donc anisotrope et à viscosité négligeable.

b- Caractérisation de l'opérateur

L'opérateur fera usage de l'action gestuelle, de la perception visuelle et proprio-tactilo-kinesthésique. La portée des organes d'action et de perception est supérieure à celle exigée par l'environnement et l'objet.

c- Caractérisation de l'objet

Il s'agit de deux pièces de masses m, de rigidité r, de viscosités z, non-articulées, anisotropes, de couleurs quelconques (la couleur n'a pas d'importance dans cette tâche, les objets sont clairement distinguables), homogènes et passifs.

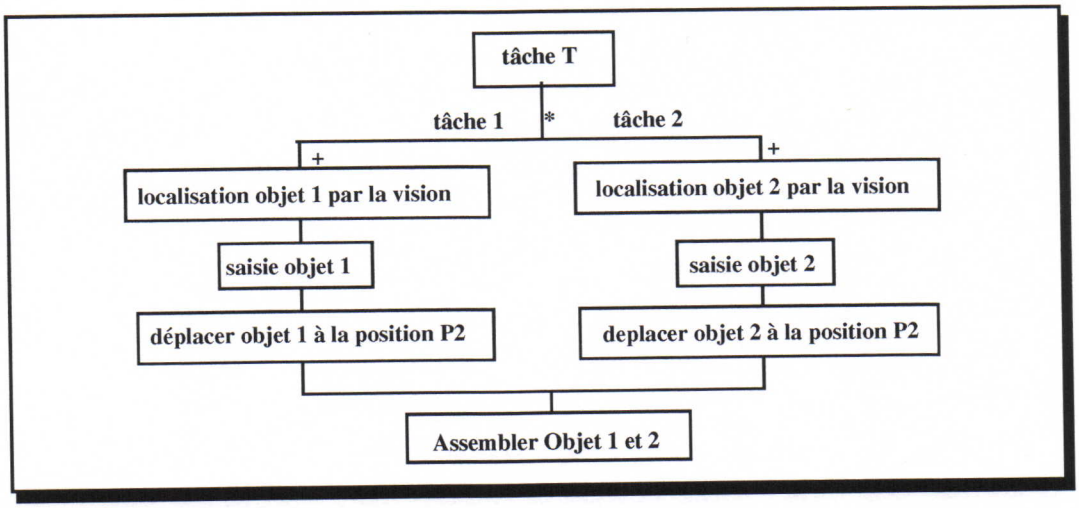


***Figure 4.4** : Décomposition de la tâche*

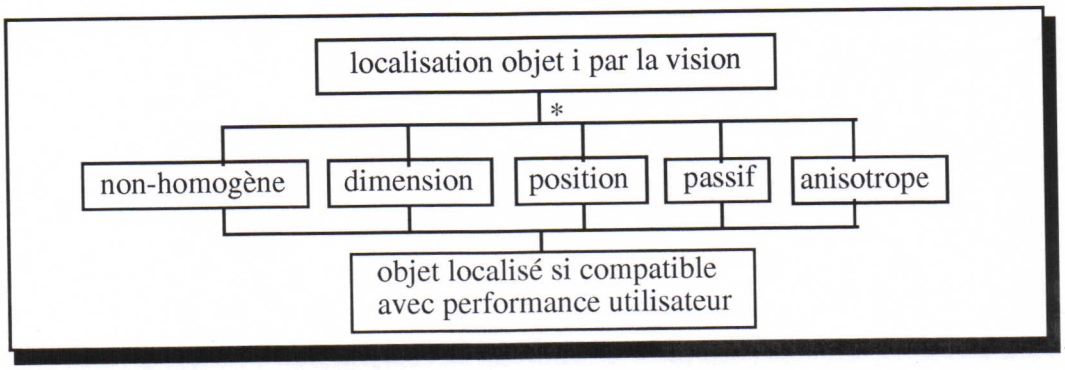


***Figure 4.5** : Décomposition de la tâche de localisation*

d- Caractérisation de la tâche

La tâche n'est pas rapide mais précise (précision donnée par la qualité de l'assemblage). Les deux positions initiales sont les positions relatives des pièces, et la position finale représente la position des deux pièces assemblées.

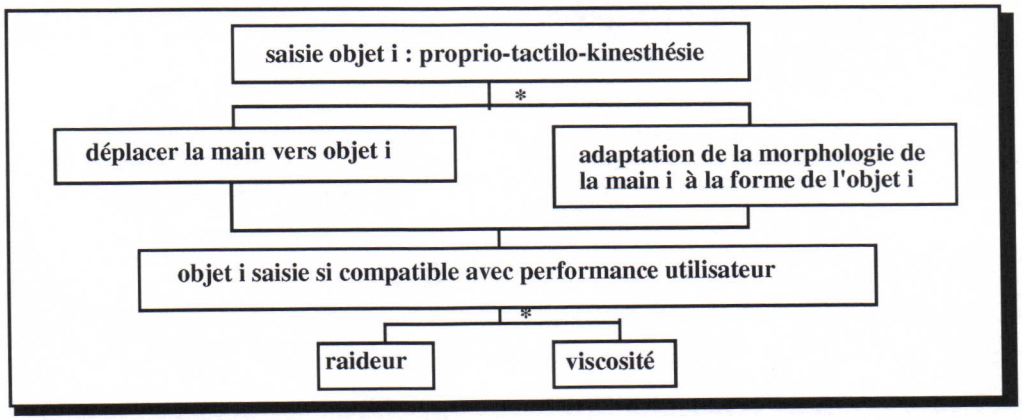


Figure 4.6 : *Décomposition de la saisie*

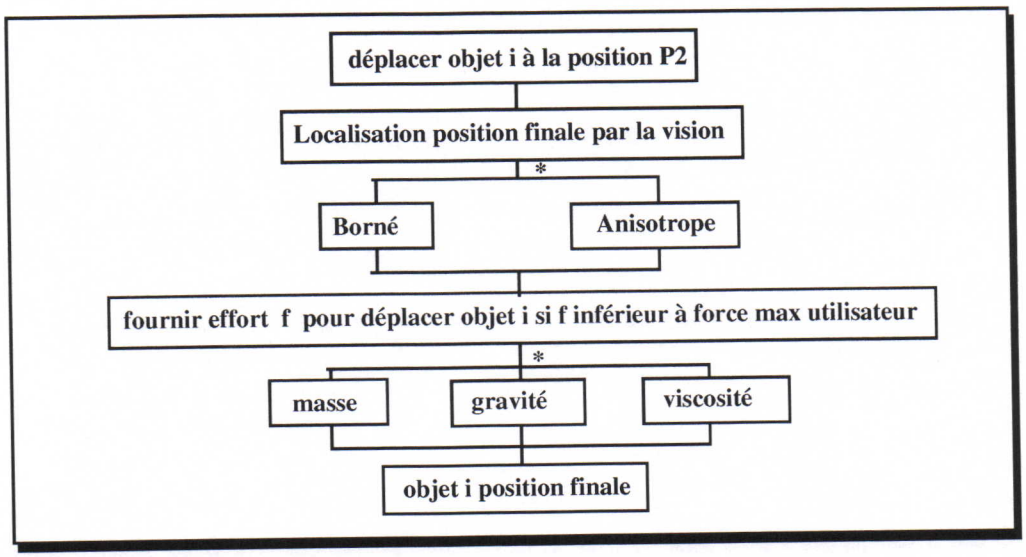


Figure 4.7 : *Décomposition du déplacement*

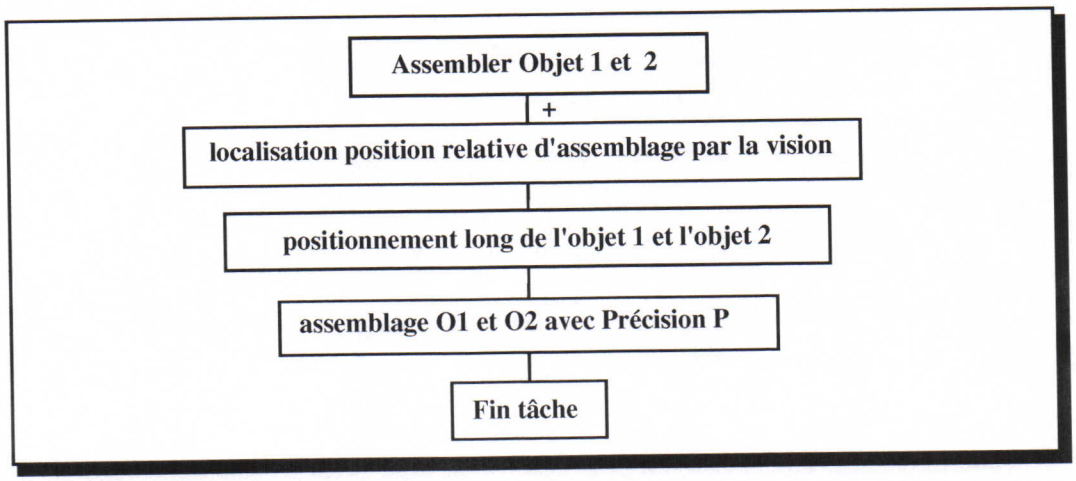


Figure 4.8 : *Décomposition de l'assemblage*

6. Conclusion

D'autres méthodes pour la caractérisation des tâches ont été développées, telles que la méthode MAD (Méthode analytique de description) développé par D.Scapin [Sca89]. Ce formalisme est basé sur la décomposition hiérarchique des tâches reliées par des opérateurs de construction. MAD ne s'intéresse qu'aux différentes étapes de réalisation de la tâche et ne prend pas en compte les caractéristiques des objets manipulés bien qu'elles puissent influencer notablement la réalisation de la tâche. La méthode décrite dans ce chapitre est plus générale. Elle prend en compte les étapes de la tâche, ses contraintes temporelles et spatiales mais aussi les performances de l'opérateur et les caractéristiques des objets et de l'environnement.

Dans la caractérisation de la tâche, nous n'avons pas considéré l'utilisation d'un instrument manipulé par l'opérateur et agissant sur l'objet, ainsi que les contraintes qu'il peut introduire. Dans le cas où l'opérateur ne peut intervenir directement pour la réalisation de la tâche, il nous faut faire intervenir des instruments intermédiaires de manipulation. Ces instruments ont certaines caractéristiques leur permettant d'adapter les propriétés de l'opérateur à celle de la tâche. Dans le chapitre suivant nous présenterons les situations où l'opérateur exécute une tâche à l'aide d'un objet instrumental intermédiaire et nous évoquerons les influences de l'instrument sur les actions et perceptions de l'opérateur. Nous présenterons alors le concept d'anamorphose et ses manifestations dans le cas où la tâche instrumentale est réalisée avec un ordinateur.

Chapitre 5

Anamorphose

"Les Ambassadeurs" Holbein

"Les cinq sens - la vue, l'ouïe, l'odorat, le goût et le toucher sont des fenêtres ouvertes sur le monde. Les organes sensoriels fournissent au cerveau de l'information sur l'environnement ; le cerveau interprète cette information et la fait correspondre avec celle qu'il possède déjà."

P.H.Lindsay & D.A.Norman [Lin80]

Dans les sections précédentes, nous nous sommes intéressés à l'exécution d'une tâche par l'homme, en considérant les aspects actifs et perceptifs, ainsi que la manière dont ceux-ci étaient dépendant des objets en cause dans cette exécution. Ainsi, nous n'avons pas considéré les aspects cognitifs en général et en particulier nous n'avons pas considéré les modalités d'adaptation aux outils utilisés pour l'exécution de ces tâches. Nous avons, en

quelque sorte, considéré l'homme agissant "comme nu de toute expérience". Or l'invention même des outils supposent une analyse de la tâche par l'homme et une capacité de reconstruction de son monde manipulatoire pour l'adapter à la fois et à la tâche et à ses capacités propres. Dans ce processus, s'effectuent implicitement des comparaisons entre différentes manières d'aborder une tâche et différents outils susceptibles d'en améliorer son exécution. Dès lors qu'il y a "usage d'un outil ou d'un instrument volontairement choisi ou construit par l'homme", apparaît nécessairement une notion de différence par rapport à une autre situation, que celle-ci soit sans outil ou avec un outil différent, donc une notion de transformation et de comparaison.

Dans le cas de l'exécution d'une tâche par, avec ou via l'ordinateur, telle que nous l'avons définie précédemment, il y a nécessairement un intermédiaire. Dans ce cas, la tâche n'est jamais effectuée sans médiateur, tant pour l'action que pour la perception. Ce médiateur est l'ordinateur équipé de ses moyens d'interaction avec l'homme et de ses moyens d'interaction avec la tâche lorsque celle-ci est extérieure à lui.

Compte tenu du fait que l'ordinateur nous impose toujours une médiation, et compte tenu de plus de l'une de ses propriétés principales qui est la flexibilité et la versatilité de ses comportements et apparences, la notion de "comparaison" ou de "transformation" d'une situation d'exécution d'une tâche par rapport à une autre, est au cœur de la problématique de l'usage de l'ordinateur comme outil d'exécution de tâches.

Nous avons indiqué précédemment dans quelles conditions ce médiateur pouvait se présenter vis-à-vis de l'homme comme un instrument matériel. Nous avons également travaillé sur l'importance d'avoir avec ce médiateur ce type de relation qualifiée d'instrumentale. La notion de "transformation" ou de "comparaison" d'une situation instrumentale par rapport à une autre ou par rapport à une situation instrumentale de référence, est au cœur de la problématique de l'ordinateur-instrument.

La notion d'anamorphose, usuellement dédiée aux transformations de formes visuelles, n'a de sens que dans le cadre d'un processus comparatif. Nous avons indiqué également qu'une des propriétés de cette situation instrumentale était la multisensorialité. Nous appliquerons ici le terme d'anamorphose dans le cadre de situations instrumentales multisensorielles. En effet, les transformations que peut subir cette situation, si elles comprennent les transformations des représentations visuelles, comprennent également les transformations des autres représentations. Or, puisque dans le cadre de l'ordinateur il y a continuité dans le jeu des transformations que l'on peut faire subir à des représentations de nature différentes, visuelles, auditives ou gestuelles, la restriction du terme "anamorphose" aux transformations des représentations visuelles, n'est plus de mise. Cette notion peut donc s'utiliser "sans qualificatif", pour désigner indifféremment toute ou partie de ces transformations. Elle peut se préciser, si besoin est par un qualificatif comme "anamorphose visuelle", "anamorphose auditive", "anamorphose gestuelle", "anamorphose multisensorielle", pour chacune des dimensions de représentation principales dans lesquelles l'ordinateur peut intervenir.

Nous restreindrons dans notre travail, la signification du terme "anamorphose" aux transformations que l'ordinateur permet dans la situation d'exécution d'une tâche

instrumentale et multisensorielle, en comparaison soit avec d'autres formes d'outils informatisés, soit avec d'autres formes d'exécution non informatisés de la même tâche. Nous étudierons alors dans ce contexte, les influences de celles-ci sur les tâches en fonction de différents paramètres de transformation autorisés par l'ordinateur : transformation de la représentation visuelle, de la représentation sonore, des modalités d'action ou de perception gestuelles, et des diverses modalités de multisensorialité.

1. L'anamorphose

1.1. Activité comparative et effet de contexte

Nous avons dit précédemment que, lorsqu'un message est créé ou retransmis via un ordinateur, il ne l'est jamais de façon immédiate. Il traverse toujours un système de représentation objectif. Comme dans toute situation de l'homme au monde via un système de représentation, une même situation peut donc être par principe représentée de manière multiple. Cette différence de représentation peut affecter l'objet même de l'intérêt du sujet ou bien son contexte. Elle induit par ailleurs l'existence d'une activité comparative dans l'appréciation d'un objet ou d'un phénomène par rapport à une référence.

D'après Lindsay et Norman, [Lin80] pour reconnaitre un *signal* provenant de l'environnement, le cerveau l'interprète et le compare aux informations qu'il possède déjà et plus exactement à la connaissance qu'il a acquise. Les auteurs introduisent alors la notion d'*état de connaissance*. Une information se trouvant dans l'état de connaissance constitue la *représentation interne*. Les informations du monde extérieur sont *interprétées* par rapport à cette représentation interne.

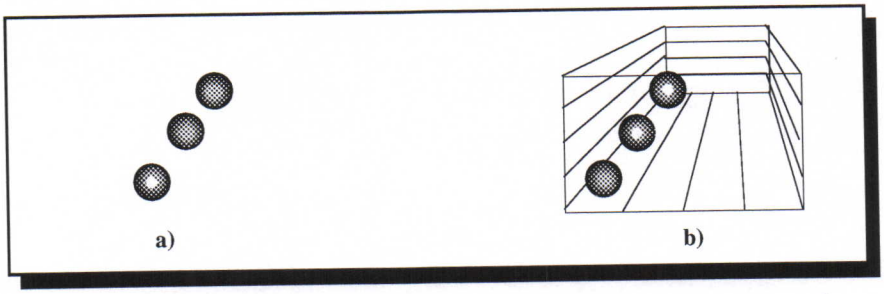


Figure 5.1 *: Différence d'interprétation avec le changement de contexte. a) les billes ont la même taille.*
b) en changeant le contexte les billes sont perçu avec des tailles différentes

Le processus d'interprétation dépend du *contexte*. Par contexte, on entend l'environnement global, externe au sujet, et dans lequel s'effectue la perception *(figure 5.1)*. Supposons que nous percevions deux ensembles de signaux E1 et E2, on s'intéresse à l'ensemble E1 plus particulièrement et l'on cherche à l'interpréter. Il est possible que l'interprétation de E1 isolé de E2 ne soit pas la même que l'interprétation que E1 avec E2. Dans ce cas là on dit que les

signaux E2 sont des signaux contexte (autrement dit la perception des signaux E2 influent sur l'interprétation des signaux E1, par extension on dira que les signaux E2 ont un effet de contexte).

Les informations perçues de l'environnement peuvent être mal interprétées et même parfois, ne pas être interprétées du tout si elles ne correspondent à aucune représentation de l'état de connaissance. Ceci peut être dû à un manque d'information, à un surplus d'information ou à une transformation quelconque. Ceci peut être vérifié en contemplant les peintures de certains artistes : Dali[1], Holbein[2], et les travaux d'Escher... qui illustrent bien ce phénomène de transformations géométriques rendant méconnaissables les objets perçus.

La difficulté avec laquelle on interprète une information représente *la distance d'interprétation* [Nig94]. Plus cette distance d'interprétation est importante plus l'effort cognitif pour l'adaptation de notre représentation interne est important. Cette distance peut être diminuée par le changement du contexte.

Par analogie avec la distance d'interprétation, nous avons aussi la distance d'exécution qui représente les situations demandant un effort cognitif supplémentaire pour passer de l'intention à l'exécution de l'action physique. Ces situations peuvent se présenter, par exemple, lorsque la main organe d'action n'est pas adaptée à la tâche à effectuer, pour des raisons morphologiques ou autres.

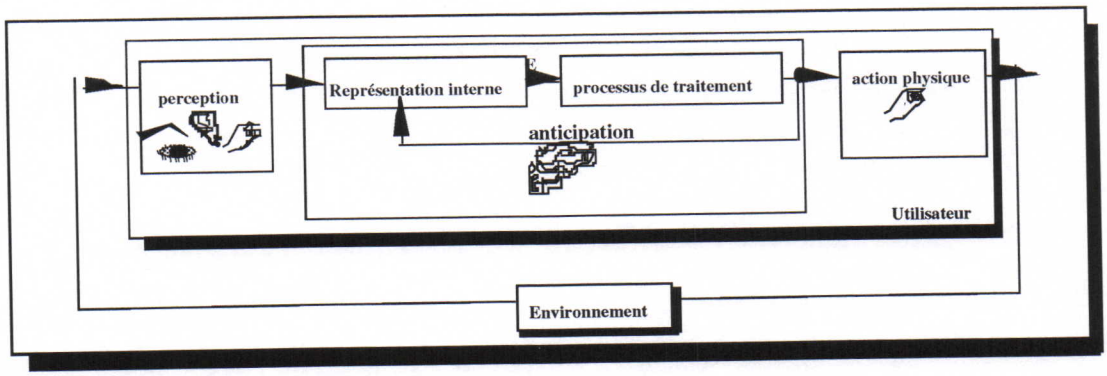


Figure 5.2 : *Représentation simplifiée de la boucle de traitement de l'information par l'opérateur.*

1.2. Définition dans la littérature

Le mot anamorphose vient du Grec, *anamorphoun* qui signifie transformer. Selon le dictionnaire Larousse [Lar96] l'anamorphose est une image déformée d'un objet donnée par certains systèmes optiques (miroirs courbes, etc.), c'est aussi une représentation (peinte, dessinée, etc.) volontairement déformée d'un objet dont l'apparence réelle ne peut être distinguée qu'en regardant l'image sous un angle particulier au moyen d'un miroir courbe *(figure 5.3)*, en médecine, c'est une déformation volontairement provoquée de l'image radiographique d'une partie du corps, destinée à mettre en évidence des détails peu visibles.

[1]"The Slave Market whith disappearing Bust of Voltaire", S.Dali
[2]"The Ambassadors", Holbein

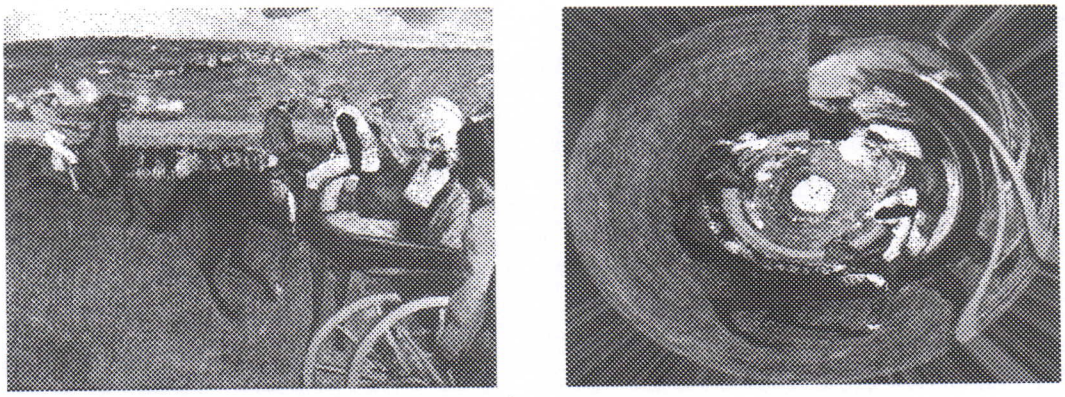


***Figure 5.3** : Transformation par une anamorphose polaire [Degas]*

Pour les mathématiciens [Bou83] : " l'anamorphose est un principe utilisé pour la construction de *nomogrammes* dans le plan. Il consiste à graduer deux droites perpendiculaires à l'aide de deux échelles fonctionnelles de façon que toutes les isoplèthes soient des droites (*Principe d'anamorphose de Lalanne*). Dans cette définition, un *nomogramme* est un système de courbes permettant par simple lecture en s'aidant d'une règle d'effectuer certains calculs numériques. Soit une relation entre n variables. A chacune d'elles, on fait correspondre une famille de points ou de courbes appelées isoplèthes et à chaque isoplèthe est affectée une valeur numérique de telle façon que, si on connaît les valeurs des $(n - 1)$ variables qui entrent dans la relation, la valeur de la n-ième apparaît par une simple lecture. Par exemple, la table de multiplication peut être représentée à partir de la relation $z = xy$ par un nomogramme admettant trois familles d'isoplèthes. Dans certains cas, on peut avantagement transformer par anamorphose les isoplèthes courbes en isoplèthes droites. Les nomogrammes sont utilisés surtout dans des applications scientifiques, techniques, industrielles ou économiques, mais leur construction relève de travaux mathématiques."

Dans notre travail, la notion d'anamorphose correspond aux concepts énoncés ci-dessus (l'un qualitatif et intuitif, l'autre formel et mathématique), mais nous en généraliserons l'usage pour des formes et des objets appréhendés selon d'autres modalités que la vision ou la représentation graphique : les formes tactiles et kinesthésiques (perceptibles par le canal gestuel) ainsi que les formes acoustiques.

1.3. Les phénomènes ou "signaux" sujets à anamorphose dans la situation instrumentale

Nous avons évoqué ci-dessus, en référence à Lindsay et Norman, que l'information perçue est véhiculée par un ensemble de signaux. Nous allons commencer par clarifier un peu la notion de signal car, dans le cadre dans laquelle notre recherche se trouve naturellement placée, cette notion peut être sujette à ambiguïté. Lindsay et Norman entendent par "signal" le phénomène objet de la perception par le sujet percevant. Ce phénomène peut être un phénomène lumineux, acoustique, mécanique, tactile, les phénomènes étant eux - mêmes classés dans ce contexte compte tenu de la nature des capteurs humains.

Lorsque ces mêmes phénomènes sont captés (interprétés) par des capteurs artificiels (caméra, microphone, ...) ou, respectivement, produits par des effecteurs artificiels (écran de visualisation, haut-parleur), on appelle signal le phénomène généré par le capteur, porteur de l'information (signal électrique vidéo, signal électrique acoustique ...), ou absorbé par l'effecteur.

Nous parlerons de phénomènes perceptibles pour le premier cas (au sens de Lindsay) et de signaux dans le deuxième cas (au sens purement technologique).

Les phénomènes principaux qui sont en jeu et sujets à anamorphoses entre deux situations instrumentales sont les phénomènes mécaniques, lumineux et acoustiques. Les signaux qui les représentent, liés aux capteurs artificiels capables de les capter ou aux effecteurs artificiels capables de les produire, sont des positions et des déplacements, des forces, des intensités lumineuses, et des intensités acoustiques. Ils peuvent être caractérisées par des propriétés spatiales et temporelles.

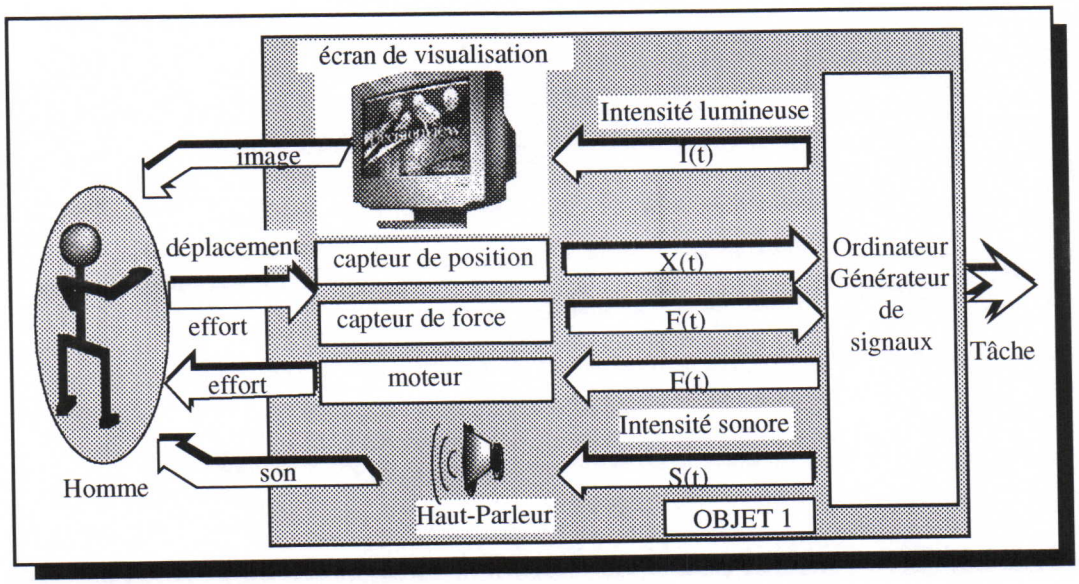


Figure 5.4 : *Caractérisation phénoménologique et technologique d'une situation instrumentale avec l'ordinateur*

La *figure 5.4* caractérise en ces termes une situation instrumentale spécifique avec l'ordinateur : l'homme interagit avec une tâche via un ensemble de phénomènes émis et perçus. Ces phénomènes sont des images, des sons, des déplacements et des efforts. Ils sont produits et reçus par des systèmes artificiels capteurs et moteurs. Ces capteurs et moteurs produisent ou acceptent des signaux dépendant du temps qui sont respectivement : des intensités lumineuses I(t), des intensités acoustiques S(t), des positions X(t), des forces F(t). Ces signaux sont générés ou acceptés par l'ordinateur. Nous appelons dans ce paragraphe "Objet Artificiel X" la totalité de ce qui se trouve dans le cadre grisé et qui s'interpose entre la tâche et l'homme. Il est donc constitué des transducteurs visuels, gestuels, acoustiques et de l'ordinateur. Pour des transducteurs donnés, il se caractérise objectivement par {I(t), S(t), X(t), F(t)}

L'étude de l'anamorphose dans les situations instrumentales informatisées consiste en la comparaison de situations dans lesquelles, pour une tâche donnée, l'un des deux pôles (Homme, Objet Artificiel X) varie.

Un cas initial consiste en la comparaison, pour une même tâche, entre une situation avec {Objet Artificiel X} ainsi défini et une situation avec un autre objet générant des phénomènes non produits par un ordinateur et que nous pourrions appelé {Objet Mécanique Y}. Dans cette situation, nous comparons alors l'exécution d'une tâche par le média d'un outil informatisé et par le média d'un outil non informatisé.

Un cas originel, fréquent mais néanmoins particulier, est le cas où l'objet {Objet Mécanique Y} par le biais duquel l'homme réalise la tâche dans le monde non informatisé n'existe pas, comme c'est le cas pour une manipulation directe sans instrument. Nous serons alors amené à comparer le cas de l'exécution de la même tâche avec {Objet Artificiel X} et {Objet Mécanique Y = inexistant}. Dans le cas de la réalisation d'une tâche via l'ordinateur, l'objet {Objet Artificiel X} n'est jamais inexistant.

Nous pouvons évaluer alors un critère de distance d'interprétation. Pour cela, il faut définir, lors de l'expérience, dans la totalité des phénomènes en cause, un phénomène cible E1, les autres étant le "contexte". Supposant le phénomène E1 bien ciblé par rapport à la tâche, des situations anamorphosées peuvent se décliner par changement de contexte. Nous pouvons alors chercher une diminution de la distance d'interprétation en effectuant des anamorphoses sur les phénomènes-contexte.

2. Quelques paramètres simples d'anamorphose

Des expériences pratiques et des transformations possibles sur les forces et les positions, nous avons pu déterminer quelques paramètres d'anamorphoses de base. La liste de ces paramètres n'est pas exhaustive *(figure 5.5)* :

- Changement de direction : par exemple, dans un cas, le déplacement se fait de gauche à droite et dans un autre cas de droite à gauche. Dans un cas, une force positive est appliquée vers le haut et dans l'autre cas, elle est appliquée vers le bas ...
- Changement de type de déplacement : dans un cas, le déplacement serait une translation, dans l'autre une rotation.
- Changement de disposition : un exemple serait le changement de disposition des touches d'un clavier alphanumérique.
- Changement de l'échelle : les deux phénomènes produits (force, déplacement ...).
- Nombre de signaux : le nombre de signaux dans l'information reçue par l'opérateur est réduit ou augmenté par rapport au nombre de signaux qu'il avait reçu lors d'une autre

expérience. Il peut s'agir par exemple de la réduction du nombre de degrés de libertés d'un dispositif physique de manipulation, de la projection d'une représentation 3D sur 3 plans 2D,...

- Composition : c'est l'utilisation de deux ou plusieurs des transformations décrites plus haut en même temps. Par exemple, nous sommes en présence en même temps d'une anamorphose de déplacement et de disposition.

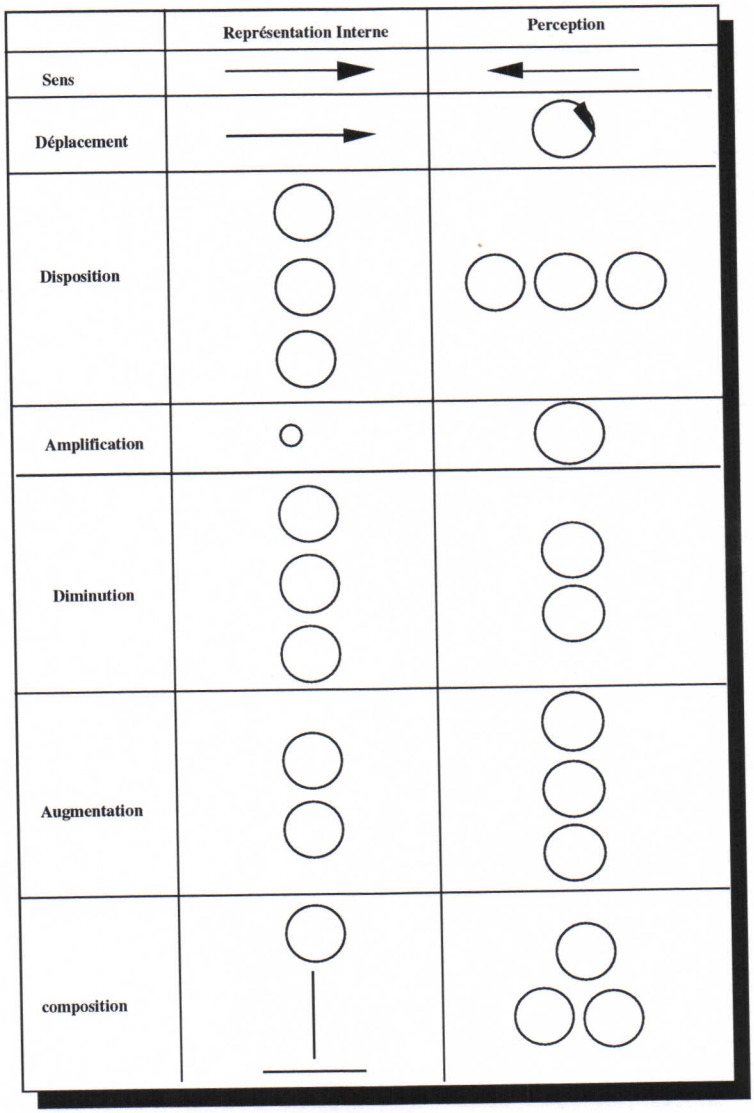


Figure 5.5 : *Différentes situations d'anamorphose géométrique*

Nous remarquons bien que cette étude peut être généralisée à d'autres signaux, autres que ceux de position et de force. Par exemple, on peut considérer que l'ombrage d'une image ou la texture, ... sont des signaux caractérisant le réalisme d'une image. Plus ce nombre est réduit, plus il est possible que la distance d'interprétation soit importante.

3. Point de vue

La notion d'anamorphose étant finalement évaluée par l'opérateur humain, elle peut être considérée selon deux points de vue selon l'objectif recherché : celui de l'opérateur humain et celui du contexte. Pour un {Objet Artificiel X} ou un {Objet Mécanique Y} donnés, on peut en effet rechercher une adaptation des performances de l'opérateur pour l'interprétation des informations et l'exécution d'une action. Mais on peut au contraire rechercher une adaptation du contexte aux performances de l'opérateur. Dans le premier cas, on exige de l'opérateur un effort cognitif plus important ; dans le second, on doit en général modifier le contexte. Pour cela, on anamorphosera alors l'{Objet Artificiel X} ou l'{Objet Mécanique Y}. Dans le cadre de la Communication Homme-Ordinateur, changer le contexte revient donc à changer l'{Objet Artificiel X}.

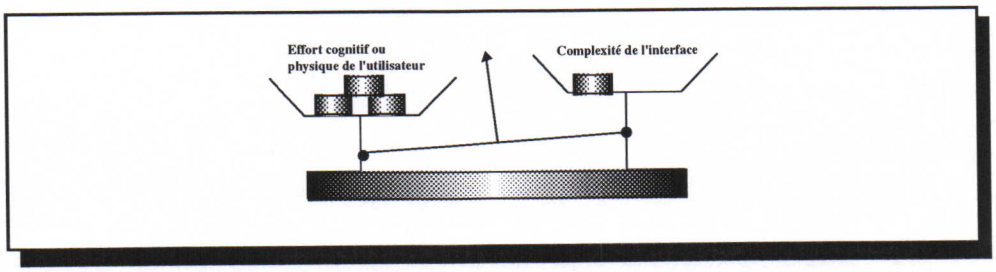


Figure 5.6 : *Balance des efforts fournis par l'opérateur et la complexité de l'interface.*

Par exemple, si l'opérateur utilise un outil qui ne permet d'effectuer que des gestes verticaux alors que la tâche nécessite des gestes horizontaux, on peut tenter de modifier la tâche elle-même de façon à ce qu'elle ne nécessite que des gestes verticaux ; on peut aussi changer l'instrument de manipulation de façon à ce que les gestes de l'opérateur soient horizontaux.

Le choix de l'une ou l'autre des solutions dépendra de plusieurs facteurs :

- au niveau de l'environnement de la tâche, par exemple ses contraintes spécifiques, celles du matériel, les commandes permises, etc.
- au niveau de l'opérateur, ses performances mentales et physiques, ses préférences, etc.

4. Classes d'anamorphoses

L'anamorphose peut être *nécessaire*, *acceptable* ou *imposée* par les dispositifs d'entrées ou de sorties ou par la tâche elle même, ou même par l'opérateur (en présence d'un handicap quelconque). Nous regroupons ces notions sous le terme *classe d'anamorphose*.

On dira qu'une anamorphose est *imposée* lorsqu'elle augmente la distance d'interprétation ou d'exécution. Elle peut être imposée par la tâche, l'instrument ou l'opérateur. Un exemple

d'une telle anamorphose se présente dans le cas de la téléconduite de véhicule rapide [Qui93], où la perception visuelle de la scène est restituée par trois moniteurs couleurs, disposés pour couvrir le champ de vision. Cette anamorphose est imposée par le matériel qui ne permet pas de donner une vision correspondant à celle que l'opérateur aurait dans le véhicule réel (la vision est asservie au mouvement du véhicule et non à celui de l'opérateur). Une anamorphose imposée peut devenir acceptable par apprentissage.

Une anamorphose est dite *acceptable* si elle n'influe pas sur la distance d'interprétation ou d'exécution de l'opérateur. Un cas d'anamorphose acceptable est la manipulation de la souris, nous effectuons un déplacement horizontal et nous observons un déplacement sur un plan vertical, cette anamorphose a été vite acceptée par tous les opérateurs.

Une anamorphose est dite *nécessaire* lorsqu'on l'introduit volontairement pour diminuer la distance d'interprétation ou d'exécution de l'opérateur. C'est le cas de la représentation par icône des avions sur les écrans radar : bien qu'aujourd'hui ces écrans permettent de visualiser des objets graphiques plus complexes, la représentation simplifiée a été conservée car l'information utile n'est pas la forme ou la couleur de l'avion mais sa position.

5. Degré d'anamorphose

Les distances d'exécution ou d'interprétation peuvent être décrites par la performance de l'opérateur. La performance peut représenter une variable spatiale ou/et temporelle ou bien un terme d'échec ou de réussite.

Nous parlerons de *degré d'anamorphose* parallèlement à la notion de performance. Le degré d'anamorphose est une mesure de l'influence de l'anamorphose sur les performances de l'opérateur. Il est représenté par le rapport de la performance de la situation sans anamorphose (ou du moins une situation ou l'anamorphose a été modifié) sur la performance de la situation avec anamorphose.

$$DgA = \frac{P_{sa}}{P_a}$$

avec DgA : degré d'anamorphose

P_a : Performance avec anamorphose

P_{sa} : Performance sans anamorphose

Par le degré d'anamorphose on pourra caractériser si l'anamorphose est acceptée, imposée ou nécessaire :

- Si le degré d'anamorphose tend vers 1, l'anamorphose est acceptée,
- Sinon elle est soit imposé, soit nécessaire ceci dépend du choix de la performance. Si nous prenons comme performance le temps minimal de réalisation d'une tâche,

l'anamorphose sera nécessaire si le DgA est très supérieur à 1, sinon elle est imposée. Si nous prenons comme performance le nombre de fois que la tâche est réussis, l'anamorphose sera acceptée si le DgA est très inférieur à 1, sinon elle est imposée.

6. Quelques exemples d'anamorphoses

Un premier niveau d'analyse permet de distinguer deux situations principales : les anamorphoses élémentaires relatives à un seul canal sensoriel et les anamorphoses combinées mettant en jeu deux ou plusieurs canaux sensoriels différents.

6.1. Les anamorphoses élémentaires

Dans l'étude de la communication multisensorielle nous nous sommes intéressés à trois canaux sensori-moteurs, visuel, gestuel, acoustique et plus particulièrement au geste et à la vision. Nous pouvons étudier des situations d'anamorphose pour chacun d'eux.

6.1.1. L'anamorphose visuelle

Historiquement la première anamorphose visuelle que l'on peut évoquer concerne la nécessité de représenter des objets tridimensionnels dans un plan (dessin, peinture) *(figure 5.7)*. C'est pendant la Renaissance que s'est alors développée la théorie de la Perspective [Hic92]. Des dispositifs matériels (vitre disposée verticalement entre l'observateur et la scène) ont été inventés pour dessiner des scènes et des objets en profondeur, sur un plan. Inversement, à la même époque, des systèmes (sphère réfléchissante) permettaient de donner d'une image plane convenablement étudiée, une représentation tridimensionnelle (autre forme d'anamorphose visuelle).

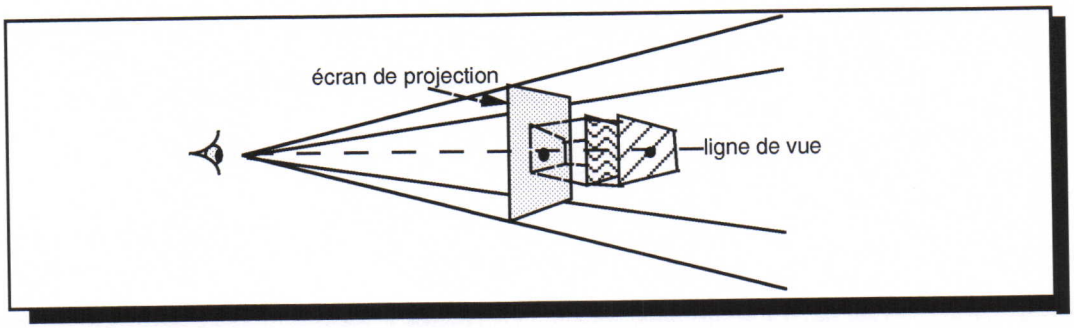


***Figure 5.7** : champ visuel à travers un écran de projection*

Plus contemporains, L'anamorphose visuelle dans les systèmes technologiques actuels est une situation fréquente. Elle résulte souvent de propriétés particulières des dispositifs de visualisation (écran 2D pour visualiser du 3D, etc..). Pour diminuer la distance d'interprétation de l'opérateur, du fait de ce type d'anamorphose le concepteur introduit d'autres types d'anamorphoses par le changement de contexte. Par exemple, en ajoutant des axes d'un repère 3D sur un écran 2D et en effectuant des projections de l'objet 3D sur les différents plans formés par ces axes on améliore la perception de l'évolution

tridimensionnelle de l'objet. Dans cette anamorphose nous avons augmenté le nombre de signaux : à partir de 3 signaux (un signal pour une dimension) on est passé a 6 (3 plans 2 dimensions).

Dans le même domaine on rencontre des cas d'anamorphoses plus radicales où un objet qui peut être très complexe sera représenté sous forme d'un simple cercle ou même d'un point. La représentation, par exemple, des avions sous formes d'icônes sur les écrans radars pour les contrôleurs aériens, correspond à un tel cas [Cha95]. Ici, l'anamorphose est caractérisée par la réduction, nous modifions le contexte en enlevant les signaux inutiles dans le but de forcer l'opérateur à tenir compte d'une information particulière.

Un dispositif de visualisation pourra également tenir compte des défauts particuliers de vision d'un opérateur [Cor70] et, par exemple agrandir artificiellement la taille des objets pour une meilleure perception des détails.

6.1.2. L'anamorphose gestuelle

Parmi l'ensemble des canaux sensoriels présentés dans les sections précédentes le canal gestuel est le seul canal qui permette à la fois de modifier physiquement l'environnement et de percevoir cette modification. Par conséquent, en ce qui concerne le canal gestuel, les deux situations d'anamorphose (actionnelle et perceptuelle) peuvent se présenter.

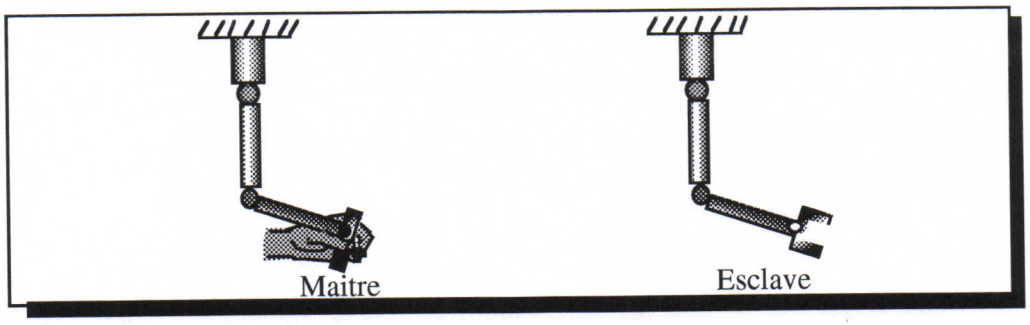


Figure 5.8 : *Exemple de manipulation idéale, système maître identique au système esclave*

L'*anamorphose actionnelle* désigne les transformations que subit le geste entre le point de manipulation de l'instrument et le point effectif réalisant la tâche. Ce type d'anamorphose apparaît dès l'utilisation d'instruments pour manipuler des objets réels dans la vie courante. L'utilisation d'un bâton pour atteindre un objet (cueillir un fruit sur un arbre) constitue un prolongement de l'action la main. L'anamorphose dans ce cas est simple, il ne s'agit que d'une translation. Ce cas d'anamorphose est équivalent à une tâche de télémanipulation *(figure 5.8)* où les systèmes maître et esclave sont isomorphes. L'anamorphose actionnelle se complique lorsque le mouvement effectué est différent de celui obtenu *(figure 5.9)*. En manipulant un cric nous faisons tourner une manivelle alors que nous obtenons un déplacement vertical. L'anamorphose dans ce cas est la transformation d'un mouvement de rotation en un mouvement de translation. Dans cette situation d'anamorphose, l'opérateur utilise un instrument pour modifier son geste. Le geste effectué subit une transformation à l'autre extrémité de l'instrument.

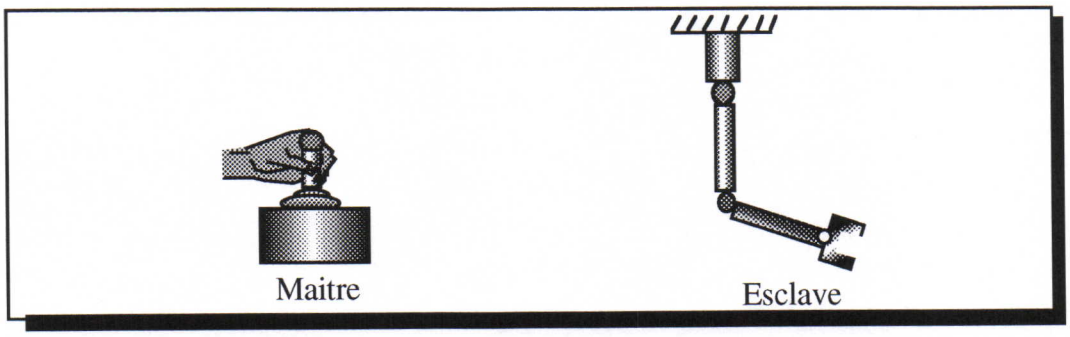


Figure 5.9 : *exemple de manipulation avec anamorphose*

Lorsque nous agissons sur un objet, nos mouvements ne dépendent pas uniquement de l'effort que nous fournissons mais aussi de l'objet sur lequel nous agissons. Au moment où l'on interagit avec l'objet, on perçoit une force qui s'oppose aux mouvements. Lors de l'utilisation d'un instrument, la force d'opposition perçue dépend des transformations effectuées par celui-ci. Il s'agit alors d'*une anamorphose perceptuelle*.

L'anamorphose gestuelle est aussi utilisée pour des changements d'échelle. Dans certaines applications on peut avoir besoin d'augmenter (macro-manipulation) ou de diminuer (micro ou nano-manipulation) les gestes de l'opérateur. C'est le cas lorsque l'échelle de l'environnement de l'opérateur et l'échelle de l'environnement de la tâche sont très différentes (manipulation d'objets de faible taille tels que des circuits intégrés ou des molécules [Bro90]).

D'autres situations d'anamorphose peuvent être imposées par la technologie des transducteurs gestuels qui ne sont pas parfaits et ne transmettent pas les vraies caractéristiques de l'objet virtuel. Dans l'état actuel, les performances de l'opérateur sont de beaucoup supérieures à celles de n'importe lequel des transducteurs gestuels du marché. Ces transducteurs souffrent des frottements, des jeux, de l'inertie, ... de la mécanique, qu'il faudrait pouvoir compenser pour améliorer la précision de la manipulation [Nou95].

L'anamorphose gestuelle peut également permettre de compenser un handicap de l'opérateur. Un conducteur handicapé pourra par exemple manipuler le volant de sa voiture à l'aide d'une poignée sphérique fixée sur le volant. Dans cet exemple, l'anamorphose permet de récupérer une force d'action importante fournie par un seul bras pour compenser la force normalement fournie par les deux bras.

Le choix de l'anamorphose est généralement empirique. Il tend à proposer l'interface gestuelle qui optimise les performances de l'opérateur dans les conditions données de la tâche. Un instrument adapté à une tâche et un contexte donnés ne l'est pas nécessairement lorsque les conditions de la tâche changent. Pour apporter des solutions rationnelles et optimales dans la plus grande diversité de situations, il est nécessaire de passer par l'analyse des capacités de l'opérateur dans les conditions de l'environnement et en interaction avec

différents types d'interfaces. Dans les situations de retour kinesthésique le changement d'interface n'est pas facile (le coût en est actuellement assez élevé)[3].

6.1.3. Anamorphose acoustique

Bien que dans notre travail on ne va pas traiter le canal acoustique, on peut dire que l'anamorphose la plus significative est celle relative à la spatialisation sonore. Plus exactement la réduction effectuée par le matériel au niveau du rendu sonore. Généralement, les machine nous fournissent un son mono ou stéréo qui est localisé, ce qui n'est pas toujours vrai pour les phénomènes naturelles.

6.2. Anamorphose combinant plusieurs canaux

La présentation des objets et leurs manipulations à travers un outil informatique se fait souvent en situation d'anamorphose. En général, les anamorphoses introduites (volontaires ou nécessaires) impliquent plusieurs canaux sensoriels et sont aussi bien actionnelles que perceptuelles.

Dans le monde réel, les perceptions engendrées lors de la manipulation d'objets proviennent d'une seule entité. Dans l'environnement informatique tout phénomène perceptible est produit par un dispositif de sortie spécifique (écran, haut-parleur, transducteur gestuel, etc.). Une situation d'anamorphose peut alors se présenter au niveau de la corrélation entre les différentes perceptions dans le temps et dans l'espace. Aussi les interfaces sensorielles fournissant les mêmes informations doivent-elles tenir compte de la manière dont l'opérateur a l'habitude de recevoir cette information dans son environnement réel. De toutes les situations d'anamorphoses, la plus importante est celle relative à la coordination entre l'action gestuelle et la perception visuelle.

6.2.1. L'anamorphose geste/vision

On peut expérimenter cela facilement : assis à votre poste de traitement de texte, prenez votre souris à l'envers (de façon à ce que le fil soit devant!) et essayez de positionner le pointeur sur l'un des dossiers se trouvant à l'écran. Vous comprenez à quel point il est frustrant de chercher à ajuster son mouvement à sa vision.

Il s'agit ici d'une situation d'anamorphose typique : celle où le geste effectué par l'opérateur ne correspond pas au déplacement observé visuellement.

En fait, même avec la souris à l'endroit, on peut dire que l'interaction habituelle avec l'ordinateur (regarder l'écran et déplacer la souris) est une situation d'anamorphose : le lieux de la manipulation et celui de l'observation visuelle ne se correspondent pas, leurs tailles peuvent être différentes, l'un est horizontal, l'autre vertical, la souris est un objet volumique, la flèche un symbole graphique plan, etc.

3 Un des intérêts de l'interface que nous décrirons dans le chapitre 6, est la possibilité de changer de morphologie à moindre coût tout en conservant des performances acceptables.

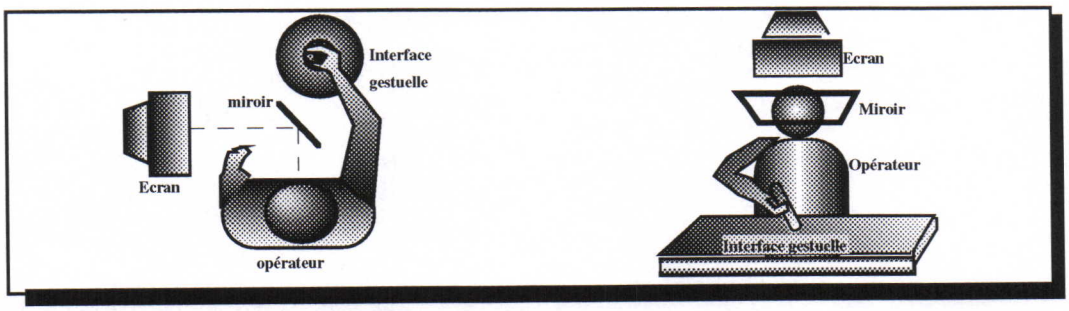


Figure 5.10 *: Configuration de deux systèmes de manipulation virtuelle*

Des travaux maintenant bien connus (ceux que l'on désigne en général sous le terme de "Réalité Virtuelle") tentent d'éliminer cette forme d'anamorphose en donnant à l'opérateur l'illusion qu'il se déplace dans un environnement réel et en intégrant la représentation de sa main elle-même dans cet environnement. Des techniques plus simples, utilisant des miroirs semi-réfléchissants permettent de faire coïncider une image de la main réelle avec sa représentation simplifiée sur l'écran *(figure 5.10)* [Iwa90]. D'autres travaux ont fait le choix de superposer aux objets du monde réel des composantes virtuelles [Fei93].

Deux cas symétriques se présentent : dans l'un, la main est représentée dans le monde virtuel, dans l'autre, l'environnement réel est "augmenté" de scènes virtuelles.

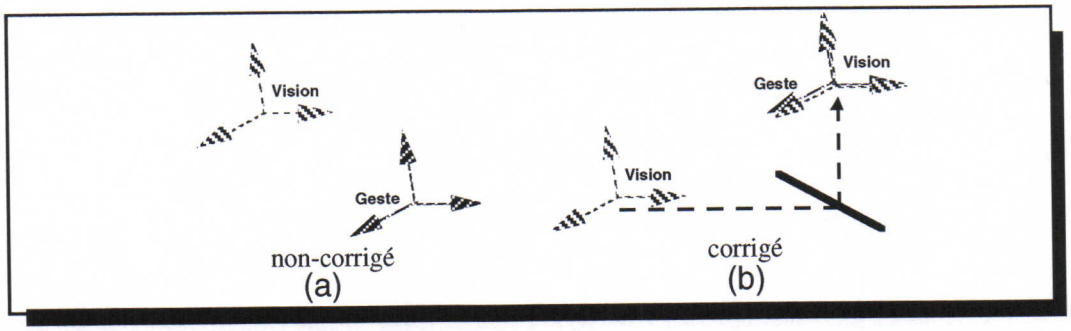


Figure 5.11 *: Correction par anamorphose du repère vision*

La fonction principale de ces transformations est la translation du repère vision vers celui du geste *(figure 5.11)*.

6.2.2. Autres situations d'anamorphoses multisensorielles

De la même façon on pourrait mettre en évidence des situations d'anamorphose s'établissant dans la chaîne du geste au son, ou encore entre les scènes sonores et les scènes visuelles. D'une manière générale, dans la mesure où notre interaction naturelle avec les objets du monde réel est sensori-motrice (perceptive et active) et multisensorielle, toute interaction sensori-motrice et multisensorielle avec l'ordinateur ou avec le monde réel via l'ordinateur est susceptible d'introduire une anamorphose globale, portant sur la cohérence entre les différents phénomènes actifs et perceptifs.

L'anamorphose "multisensorielle" est alors à comprendre comme une mise en situation de l'opérateur où cette cohérence entre les phénomènes actifs et perceptifs sort du cadre de ses références habituelles et naturelles.

Par exemple, à l'aide d'un synthétiseur musical à clavier, il est possible d'effectuer un jeu de type pianistique. Une référence naturelle se fait au phénomène physique simple de percussion d'un objet vibrant. Si le synthétiseur commandé par le clavier produit un son ressemblant à un son de violon ou de trompette, il y une profonde perturbation perceptuelle liée à l'association forcée de deux référents contradictoires : la percussion d'un côté (réalisée gestuellement) et le frottement de l'autre (évoqué acoustiquement).

Il convient toutefois de rester prudent sur un usage trop généralisé du terme "anamorphose". Nous resterons essentiellement, dans ce travail, dans le cadre de situations moins complexes où seuls les canaux gestuel et visuel sont concernés.

On peut faire état d'une autre situation, non réductible aux précédentes, où un canal particulier vient s'ajouter, voire se substituer à un autre. Par exemple, lorsque la réception visuelle normale n'est pas possible (dans le noir, dans un environnement éblouissant, ou pour les non-voyants), le canal visuel peut être, dans une certaine mesure, remplacé par le canal acoustique [Edw95] et/ou gestuel [Ram96]. La substitution et/ou la complémentarité sensorielles peuvent intervenir ou être nécessaires lorsque la tâche atteint un certain niveau de complexité, les canaux sensoriels les moins chargés peuvent être sollicités en complément, permettant une meilleure répartition de la charge sensorielle globale.

7. Conclusion

Dans ce chapitre nous nous sommes intéressés au processus d'interprétation et d'exécution de l'opérateur et à sa dépendance de la manière dont l'information est présentée. Nous avons aussi présenté le principe de l'anamorphose qui représente les situations où la perception des signaux forces ou positions par l'opérateur est différente de sa représentation interne de ces signaux, auxquels cas on parlera d'anamorphose perceptuelle. En plus de l'anamorphose perceptuelle, nous avons introduit l'anamorphose actionnelle qui représente l'effort mental fournit par l'opérateur pour exécuter une action.

Ce chapitre nous a donc permis de présenter le cadre de l'anamorphose et quelques situations particulières qui ont le plus concerné notre travail. Nous avons aussi vu l'importance de l'anamorphose dans la coordination visuo-manuelle. Dans son interaction avec la machine, l'opérateur effectue des actions particulières et s'attend à des réponses bien précises et dans le cas contraire il faudrait changer le contexte, au niveau soit du retour visuel soit de l'entrée gestuelle. Lors d'une interaction nous avons deux boucles mentales imbriquées : celle relative à la perception et celle à l'action, et la modification de l'une ne va pas sans influencer l'autre. Aussi puisque le canal gestuel permet en même temps l'action et la perception, lorsque le concepteur veut supprimer l'effet d'une anamorphose ou du moins diminuer ses

effets en ajoutant une autre, il doit tenir compte de son influence au niveau de l'entrée et de la sortie.

Dans l'*Annexe C* nous avons présenté un opérateur permettant de transformer les force et les positions dans le formalisme CORDIS-ANIMA, le module MPVR, qui représentera l'opérateur de transformation que nous utiliserons pour modifier les situations d'anamorphose.

L'étude des situations d'anamorphoses revêt une importance particulière dans le cadre de la communication homme-machine, aussi bien dans un objectif d'amélioration des dispositifs existants que pour créer de nouvelles conditions d'interaction entre l'homme et la machine, plus riches et mieux adaptées aux besoins humains et aux tâches à mener.

Dans le *Chapitre 8* nous allons effectuer quelques expériences sur l'anamorphose et montrer son influence sur les performances de l'opérateur. Nous étudierons l'influence de la corrélation entre le geste et la vision, mais aussi la compensation du canal visuel par le canal gestuel. Une de nos expériences étudiera l'adaptation de l'interface gestuelle à la tâche en utilisant une anamorphose propre à ce canal.

Partie B

Expérimentation

Chapitre 6

Matériel Expérimental

Dans ce chapitre, nous allons présenter le matériel utilisé pour effectuer diverses expériences pour l'étude de l'anamorphose dans le contexte d'une situation instrumentale informatisée, telle que nous l'avons décrite dans le chapitre précédent. Dans la première partie nous présenterons l'architecture de la machine informatique temps réel et les algorithmes de simulation utilisés pour simuler des scènes physiques virtuelles. Dans la réalisation des scènes virtuelles simulées en temps réel, il faut en effet tenir compte des contraintes de l'architecture pour pouvoir conserver la rapidité d'exécution. Dans la deuxième partie, nous présenterons le système à retour d'effort utilisé, le ©Clavier Rétroactif Modulaire, pour synthétiser les signaux à destination de la perception proprio-tactilo-kinesthésique. Ensuite, nous présenterons la méthode de calibrage et un exemple d'optimisation du stick 2D. Pour finir, nous décrirons la situation d'expérimentation.

1. Architecture Temps Réel

Dans ce paragraphe, nous traiterons de l'architecture de la machine de simulation temps réel développée dans notre laboratoire pour la simulation multisensorielle.

La simulation multisensorielle est exigeante en performance [Uhl 96], vu que la machine doit être capable de gérer plusieurs flux de données en un temps très court (< 1 ms).

Le dispositif actuel de simulation est composé de plusieurs sous-systèmes :

- Deux processeurs principaux de simulation
- Les processeurs de contrôle de l'interface gestuelle
- Un processeur de contrôle de l'interface acoustique
- Le processeur de synthèse d'images, une carte Extrême Silicon Graphics
- Des dispositifs d'entrée/sortie proprement dits : écran, transducteur gestuel rétroactif (appelé ci-après "TGR") et haut-parleurs
- Un ensemble de cartes d'interfaces sur bus VME.

Les processeurs principaux de simulation sont deux processeurs MIPS de type RISC R8000 intégrés dans une architecture SGI, fournissant une puissance de calcul de 2x300 Mflops crête. Ils constituent le coeur de la machine Power Challenge, laquelle possède également une mémoire de 64 Mo et un bus VME, lien de communication principal des processeurs avec l'extérieur *(figure 6.1)*.

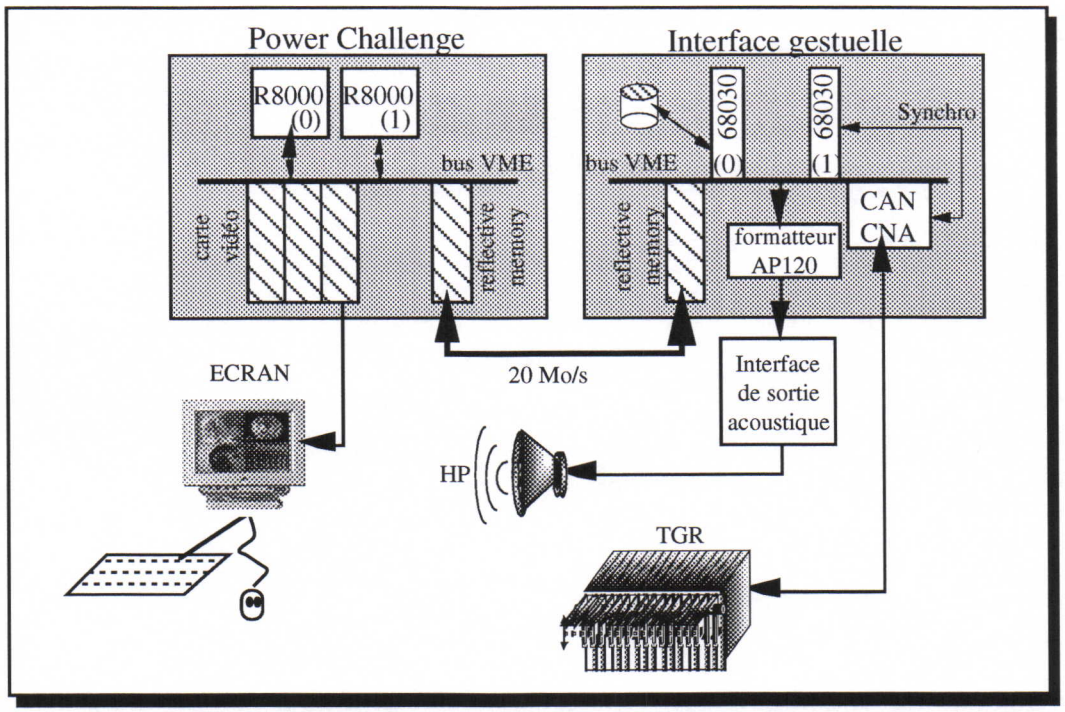


***Figure 6.1** : Schéma synoptique de l'architecture temps réel*

Les processeurs de contrôle de l'interface gestuelle sont composés de trois éléments montés sur un bus VME, deux processeurs Motorola 68030, une carte de conversion numérique - analogique et analogique - numérique, ainsi qu'un dispositif externe de synchronisation. Le premier processeur 68030 est dédié aux sauvegardes sur disque des échantillons des signaux gestuels captés ou générés tandis que le deuxième contrôle la boucle d'acquisition et de traitement des données en entrée et en sortie du périphérique gestuel rétroactif (TGR). La carte de conversion possède une technologie entièrement analogique et permet le dialogue

avec les seize voies du TGR par conversions analogique-numérique et numérique-analogique. Un signal de synchronisation cadence la simulation à fréquence réglable.

La connexion entre ce système et les processeurs a nécessité un dispositif spécifique permettant de communiquer les données de la simulation. Il s'agit de deux cartes à mémoires réflectives, montées sur bus VME. La première est montée sur le bus VME de la machine Power Challenge, et la seconde sur celui du système de contrôle de l'interface gestuelle. Chaque carte est composée d'une mémoire accessible dans la zone mémoire du bus VME, associée à un dispositif de maintien de cohérence entre les mémoires des deux cartes par une liaison à 20 Mo par seconde. Ce dispositif s'apparente alors à une mémoire partagée sans le problème de conflit d'accès. Ces deux mémoires contiennent les échantillons d'entrée et de sortie du simulateur et les numéros des paquets pour la synchronisation. Ce dispositif à double mémoire permet également de transmettre les échantillons de son d'une simulation avec retour acoustique au système de contrôle de l'interface acoustique.

Enfin, la visualisation de la simulation est faite grâce à une carte graphique Silicon Graphics. Celle-ci est montée sur trois emplacements du bus VME de la machine Power Challenge. Les échantillons de visualisation transitent directement à travers le bus VME.

1.1. Répartition des processus

La simulation d'un objet physique en temps-réel nécessite l'exécution de plusieurs processus en parallèle : un processus de calcul, un processus de visualisation de la simulation, un processus de gestion des entrées/sorties geste et des sorties sonores, et un processus de contrôle des données de la carte mémoire réflective de la station "Power Challenge". Donnons alors les fonctions remplies par chacun de ces processus et le mode de communications des données entre eux.

Le processus de calcul fonctionne en mode temps-réel synchrone, et est uniquement exécuté sur le processeur (1), dit 'temps-réel', de la machine Power Challenge. Il effectue tout d'abord l'initialisation des positions et des forces ainsi que des paramètres de la simulation. Toutes ces variables sont ensuite verrouillées en mémoire pour éviter tout "swap" du cache vers la mémoire principale partagée par les deux processeurs. Puis on procède aux opérations système de mise en priorité maximale du processus, de non-préemptibilité et d'exécution du processus sur le processeur temps-réel . Les zones de mémoire partagées entre ce processus et le processus d'affichage sont définies ainsi que la zone mémoire réservée à la mémoire réflective. Vient enfin la boucle principale de la simulation de durée d'exécution infinie *(figure 6.2)*.

Enfin, un processus de contrôle des données de la carte mémoire réflective permet de visualiser la valeur des données qui transitent par cette carte et des compteurs de synchronisation. C'est ce processus qui va permettre de stopper la simulation par écriture de 0xFF dans le compteur de synchronisation du processus de l'interface gestuelle.

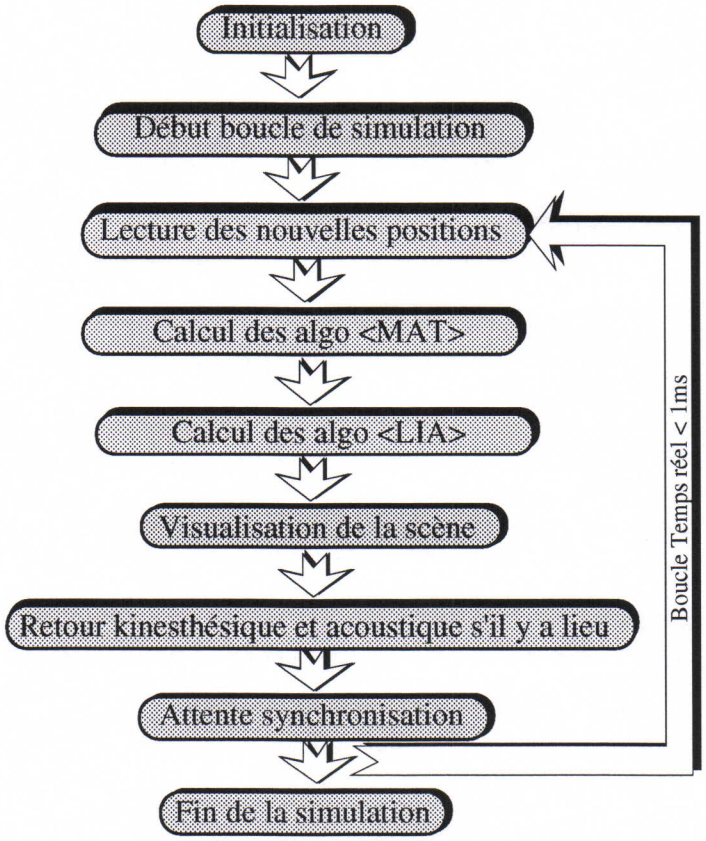


Figure 6.2 : *Séquencement des cycles de simulations*

L'architecture des processeurs permettant le temps réel et des processus donnée dans les schémas ci-après fait l'objet d'un brevet[1]

2. Le clavier rétroactif modulaire (CRM)

Le TGR que nous avons utilisé est le dernier système à retour d'effort réalisé par l'ACROE. Il s'appeller "Clavier Rétroactif Modulaire", CRM en abrégé. Il est constitué de plusieurs tranches d'actionneurs-capteurs [Lis89]. Ses performances en dynamique sont élevées. Une tranche correspond à un degré de liberté. Elle capte une position et restitué une force. La structure mécanique linéique permet d'augmenter ou de diminuer le nombre de degrés de liberté.

C'est la mise côte à côte des "tranches" qui permet d'obtenir une force de retour élevée, avec une bobine mobile de faible poids, donc permettant des temps de réponse également très courts. Chaque module comporte une bobine mobile plate qui se déplace perpendiculairement à la direction d'empilement.

[1]CADOZ (C), FLORENS (JL), LUCIANI (A), 1985 - Procédé et dispositif pour simuler un objet matériel et ses interactions avec un utilisateur - Brevet Français. Déposé le 14 / 06 / 85. N° 85 09420.

Le prototype [Lis89] déjà réalisé est un actionneur à 16 modules *(figure 6.3)*. Il équipe un clavier à 16 touches à retour d'effort, destiné aux travaux de recherche en informatique musicale et synthèse d'images animées. La plupart des pièces mécaniques sont en alliage d'aluminium usiné.

Ses performances en retour d'effort sont de 40 N avec un temps de réponse de 0,2 ms. Ces performances permettent d'obtenir une véritable sensation de réalisme des objets au niveau du toucher.

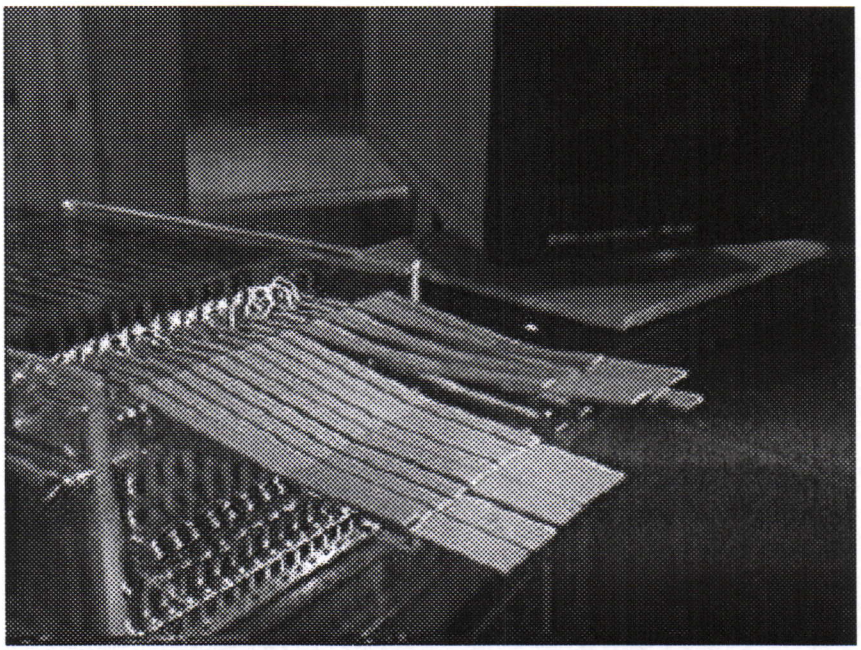


Figure 6.3 : *Le Clavier Rétroactif Modulaire* ®

Sur chaque axe actionneur - capteur, se trouve monté en standard un petit plateau, que nous appelons "touche" muni d'une queue d'aronde. Sur cette touche, des dispositifs mécaniques peuvent venir s'encliqueter permettant de transformer la morphologie mécanique apparente du dispositif. Ainsi, nous pouvons le transformer en un clavier type piano, en un joystick à 1, 2, 3 degrés de liberté, en une pince à 3 ou 4 degrés de liberté... Ces diverses morphologies mécaniques apparentes sont appelées "habillage".

3. Analyse et calibrage du clavier

Dans cette partie, nous allons présenter les caractéristiques dynamiques du CRM. Avant d'effectuer des mesures de performances, il nous faut en effet bien connaître les caractéristiques du matériel que nous utiliserons. L'opération de calibrage se fait pour les positions en entrées et les forces en sorties. La *figure 6.4* présente le schéma de conversion analogique-numérique dans le sens utilisateur-simulation et la conversion numérique-analogique dans le sens simulation-utilisateur avec le module de calibrage adéquat. Le codage

de la position est fait sur 12 bits (on ne tient pas compte des 4 bits de faibles poids du convertisseur pour éliminer une partie des bruits de mesures), la course des touches (petit plateau après l'axe moteur et avant l'habillage mécanique) est comprise entre -1, 5 cm et 1,5 cm.

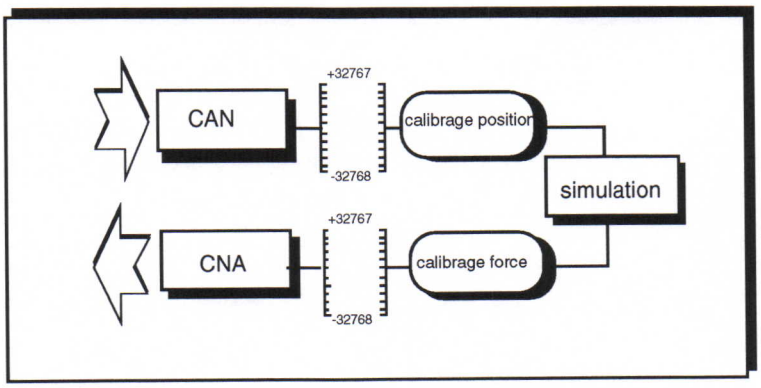


Figure 6.4 *: Plage d'entrée et de sortie des convertisseurs*

Le protocole de calibrage est effectué par les techniciens de l'équipe responsables du CRM. Il fait partie du savoir-faire de l'équipe en ce qui concerne l'utilisation des systèmes à retour d'effort. Il est applicable à n'importe quel système à retour d'effort. Les objectifs de ce calibrage sont de rendre les degrés de liberté les plus identiques possible, et de connaître les forces effectivement délivrées par le moteur pour une commande donnée. Les différentes "tranches" ont des caractéristiques pouvant différer légèrement (frottement différent, force max. et min. différente d'une touche à l'autre, usure non-uniforme, etc.). Un kit d'outils matériels et logiciels a été développé. Le calibrage est constitué en effet d'une partie logicielle et matérielle. Il ne sera pas décrit ici. Nous en donnerons les résultats nécessaires à l'évaluation du cadre de validité de nos expériences.

Le protocole de calibrage comprend :

- le calibrage du zéro mécanique de la position de chaque touche

- le repérage du zéro de position entrant dans le simulateur

- le réglage du zéro de position logiciel.

- le réglage de la force zéro

- l'estimation des forces de frottements et l'annulation logiciel de ces forces

- le réglage de la linéarité force de commande - force de sortie réelle.

Les courbes ci-après représentent différentes courbes d'étalonnage. Elles caractérisent le CRM.

La courbe *(figure 6.5)* ainsi obtenue permet de remarquer que le rapport force de commande sur force de sortie augmente avec la force de commande.

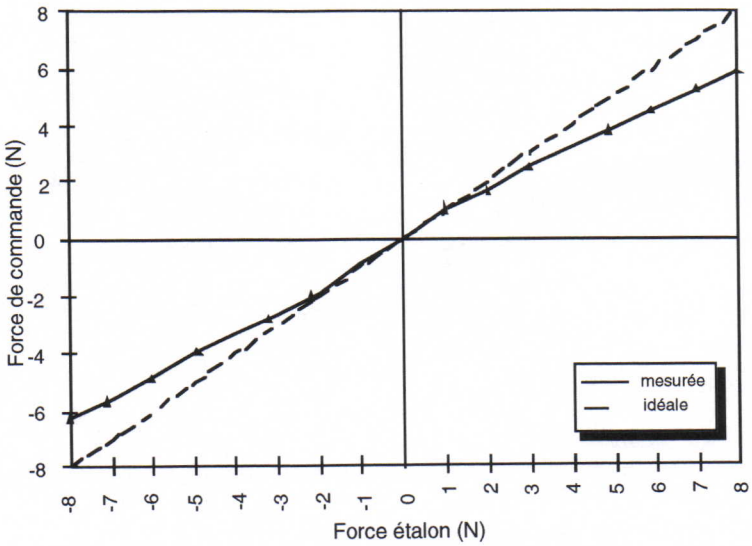
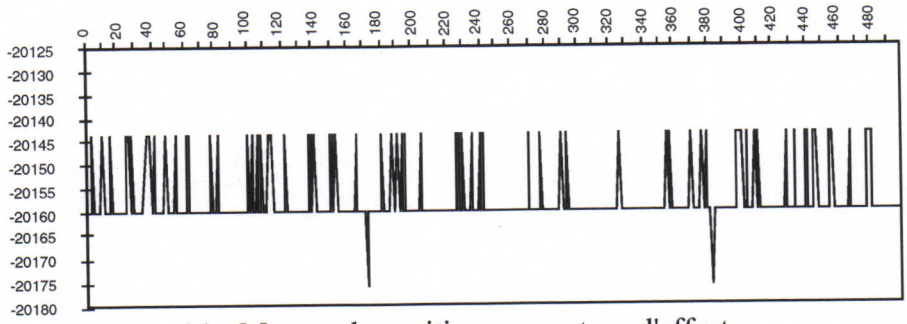
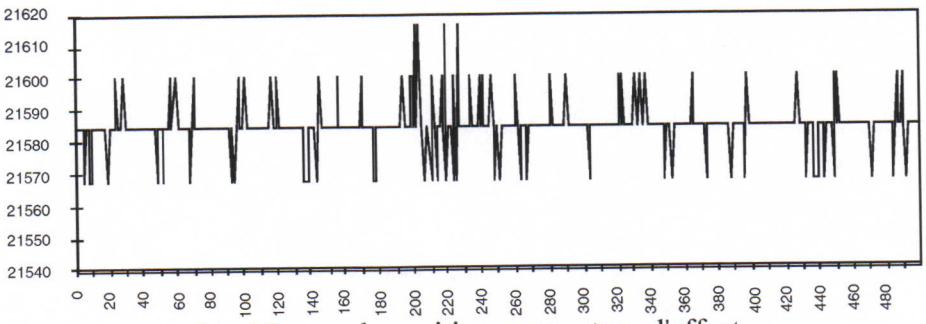


Figure 6.5 *: Mesure des forces isométriques*

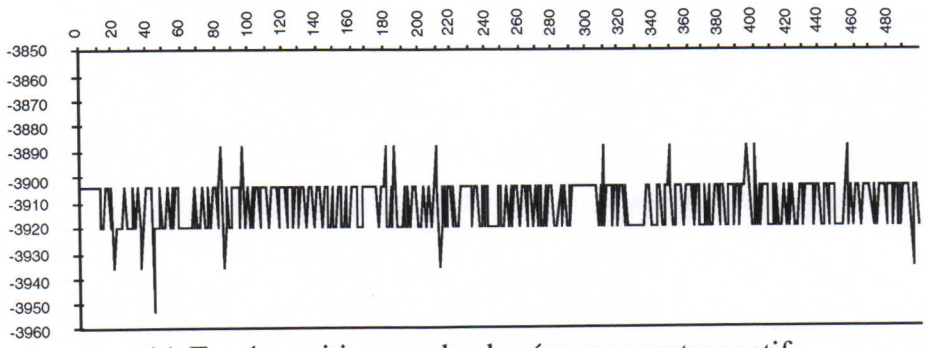
Les courbes de la *figure 6.6* représentent les mesures de position à la sortie du capteur. La figure 6.6-a représente la mesure de la position sans activation du moteur pour le retour d'effort. L'erreur de 14 µm. Les figures suivantes représentent des mesures de positions fixes avec le moteur actif, et nous trouvons une erreur variant de 22 µm à 37 µm suivant la position de la touche, ce qui représente au maximum une erreur de 0,2 %.



(a) : Mesure de position sans retour d'effort



(b) : Mesure de position avec retour d'effort



(c)-Entrée position proche de zéro avec moteur actif

Figure 6.6: *Courbes de parasites pour trois positions différentes de la touche mesurés à 1 kHz.*

4. Primitives réalisées pour l'interaction

L'organisation logicielle est partagée en trois grandes classes de modules : Gestion des entrées/sorties avec le clavier, l'affichage, le moteur de simulation.

• Entrées/Sorties du dispositif à retour d'effort

Fonction_Calibration_Position() : relation entre les coordonnées captées par le clavier (physique) et celles affichées à l'écran (algorithmique); il s'agit d'un facteur d'échelle.

Fonction_Calibration_Force() : relation entre les forces algorithmiques et physiques en sortie.

Fonction_de_Transformation_entree () : couplage entre les différents DDL, 2 ou 3D, ... et/ou transformation géométrique. Cette fonction permet de récupérer la position réelle du point de manipulation de l'utilisateur après la décompositions des DDL au niveau des capteurs de positions. Cette transformation dépend de la géométrie du l'habillage. Elle représente la transformation en entrée du Module de changement de Point de Vue Relatif (MPVR).

Fonction_de_Transformation_sortie () : découplage des différents DDL pour la sortie clavier. Transformation en sortie du Module de changement de Point de Vue Relatif (MPVR).

Lire_geste() : fonction de lecture des positions du clavier.

Ecrire_geste() : fonction d'envoi des forces au clavier.

• Moteur de Simulation

Algo_Liaison_RF() : Algorithme de traitement des liaisons ressort-frottement, cette fonction a pour entrée des positions et en sortie des forces, c'est le module LIA linéaire.

Algo_Liaison_Cond() : Fonction de traitement des liaisons ressort frottement conditionnelles, c'est un module LIA non-linéaire.

Algo_Masse() : Algorithme de traitement des masses, ayant pour entrée une force et pour sortie une position.

• Présentation

Affichage_image() : fonction d'envoi des positions à l'écran.

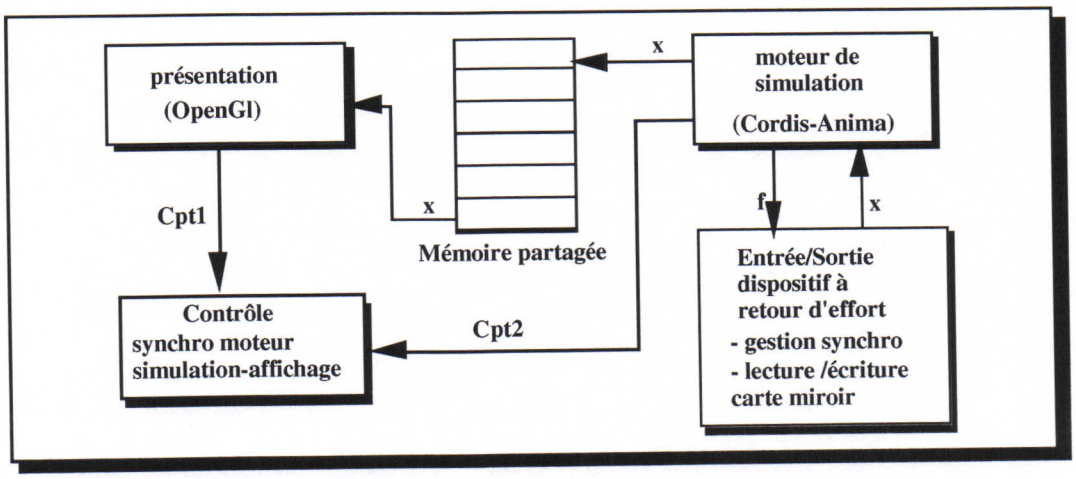


***Figure 6.7**: Communication entre les différents modules de la simulation.*

5. Dimensionnement du stick 2D

Le clavier rétroactif modulaire est constitué de 16 degrés de libertés découplés permettant ainsi de lui donner des morphologies différentes. La morphologie dépend de la mécanique que nous fixons sur les touches, que nous appelons habillage.

Cette habillage dépend du type de manipulation gestuelle à réaliser. La littérature spécialisée propose essentiellement trois types de systèmes à retour d'effort. Dans la classification qui suit nous nous sommes basés sur le type d'interaction qu'offre chaque système, et on distingue trois types *(figure 6.8)* :

- Les systèmes permettant un contact avec la surface d'un instrument (interaction entre le monde réel vers le monde virtuel à travers un instrument).

- Les systèmes permettant une projection de la main à l'intérieur de l'environnement virtuel (représentation d'une partie du monde réel dans le monde virtuel).

- Les systèmes permettant la présentation physique de la partie manipulée de l'objet virtuel à la main de l'opérateur (projection d'une partie du monde virtuel dans le monde réel).

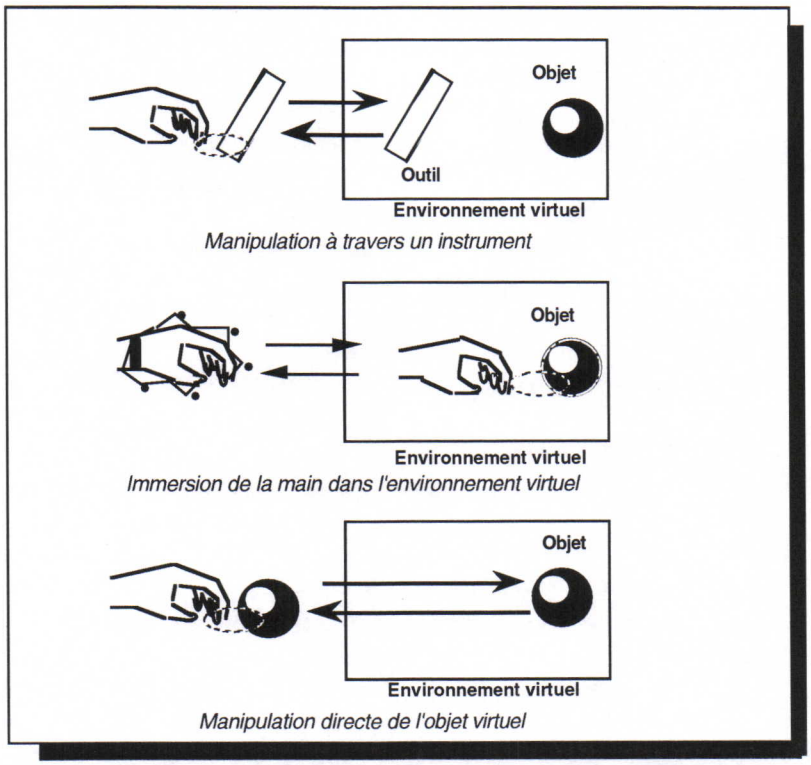


Figure 6.8 : *Différentes configurations des dispositifs de commande gestuelle à retour d'effort*

Dans ce qui suit nous allons présenter la manière utilisée pour l'optimisation des dimensions du stick 2 D et ses performances dynamiques.

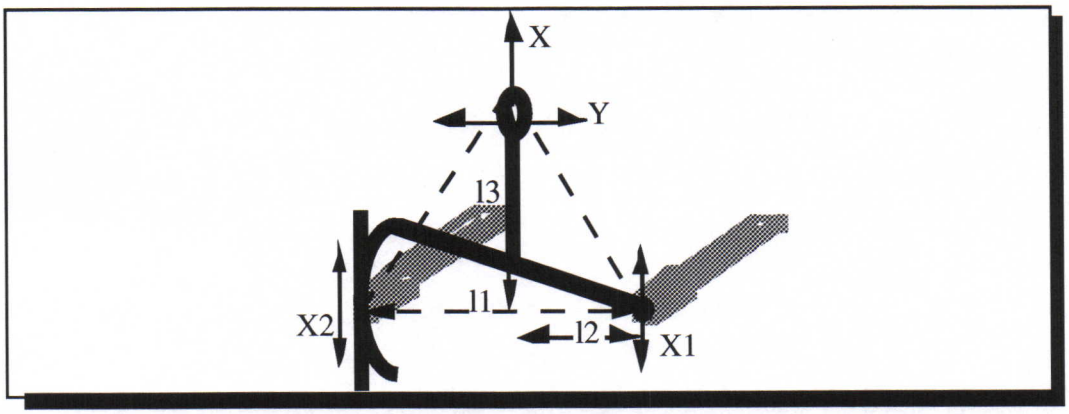


Figure 6.9 : *Stick 2D*

Le stick étudié a la forme d'un triangle, la base est liée à deux touches et le sommet représente le point de manipulation de l'opérateur *(figure 6.9)*.
Les équations gérant le déplacement du stick en fonction des déplacements des touches [Bou95] x1 et x2 sont les suivantes :

$$\begin{cases} X = -l_2.cos(\frac{x_1 - x_2}{l_1}) - l_3.sin(\frac{x_1 - x_2}{l_1}) + l_2 \\ Y = l_3.cos(\frac{x_1 - x_2}{l_1}) - l_2.sin(\frac{x_1 - x_2}{l_1}) - l_3 + x_1 \end{cases}$$

Le dimensionnement du stick revient à choisir les meilleures valeurs pour l_1, l_2 et l_3. Le choix des dimensions du stick ne se fait pas au hasard. L'objectif est de dimensionner celui-ci de telle sorte qu'il utilise une surface maximale de l'environnement de travail. Cette surface doit être la plus uniforme possible et éviter les valeurs singulières où deux degrés de liberté se trouveraient confondus. La *figure 6.10* représente la surface balayée par le point de manipulation du stick2D pour une longueur de l_1=*13,25 cm*.

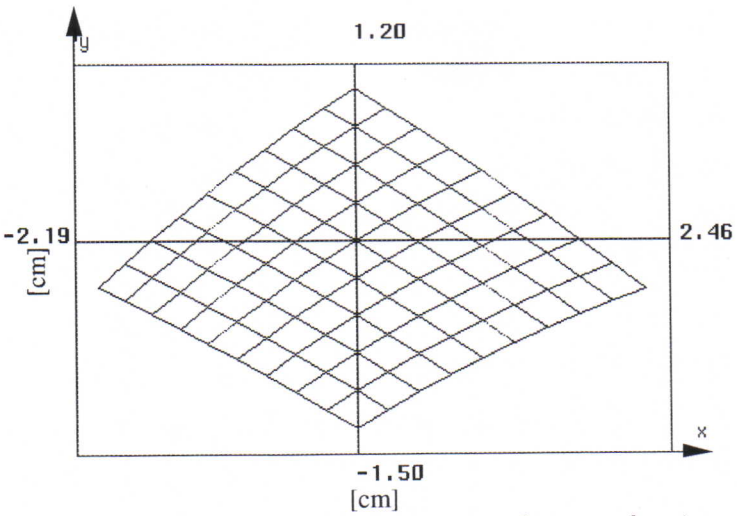


Figure 6.10: *Déplacement du point de manipulation en fonction de x1 et x2*

A côté de la surface balayée par le stick, il faut aussi tenir compte de la variation de la force sur la surface balayée par le stick. La force développée par l'actionneur subit des transformations géométriques sous l'effet du couplage entre les touches. La force n'est pas uniforme en tout point de cette surface *(figure 6.11)*. L'objectif lors de la conception est que la différence entre la force maximale et minimale soit la plus petite possible au point de manipulation lorsque le moteur fournit une force constante. La force développée par le stick est déterminée par les équations suivantes :

$$\begin{cases} F_x = \dfrac{A.f_{x1} + (A-1).f_{x2}}{B} \\ F_y = f_{x1} + f_{x2} \end{cases}$$

$$\text{avec } A = \frac{l_2}{l_1}.sin(\frac{x_1 - x_2}{l_1}) - \frac{l_3}{l_1}.cos(\frac{x_1 - x_2}{l_1})$$

$$B = -\frac{l_3}{l_1}.sin(\frac{x_1 - x_2}{l_1}) - \frac{l_2}{l_1}.cos(\frac{x_1 - x_2}{l_1}) + 1$$

La *figure 6.11* est obtenue pour f_{x1} et f_{x2} constantes et égales à la force maximale développée par l'actionneur au bout de la touche (en supposant que tous les actionneurs ont les mêmes caractéristiques) cette force est égale à 20 N. La norme de la force résultante est $\|F\|_2 = \sqrt{F_x^2 + F_y^2}$.

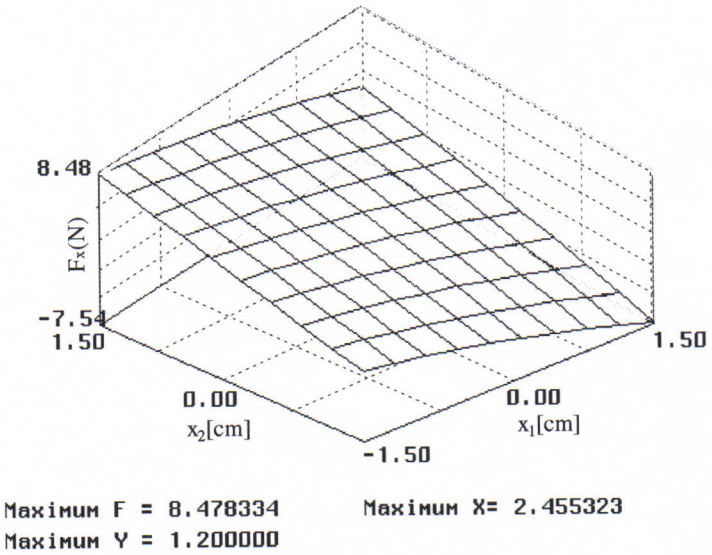


Figure 6.11: *Force en fonction de la position du point de manipulation*

Pour l'optimisation des dimensions de la morphologie des habillages, nous avons développé un outil de calcul, qui à partir des distances entre les DDL, fournit une première représentation graphique pour la surface balayée par le point de manipulation et un second graphique donnant la variation de la force sur cette surface.

6. Problème du couplage utilisateur/simulation

Dans ce qui suit nous allons nous intéresser au problème du couplage utilisateur/simulation à travers un dispositif de manipulation. Une représentation simplifiée du système utilisateur/simulation est donnée à la *figure 6.12,* ou H(p) représente la fonction de transfert utilisateur/dispositif de manipulation, et D(p) la fonction de transfert de la simulation.

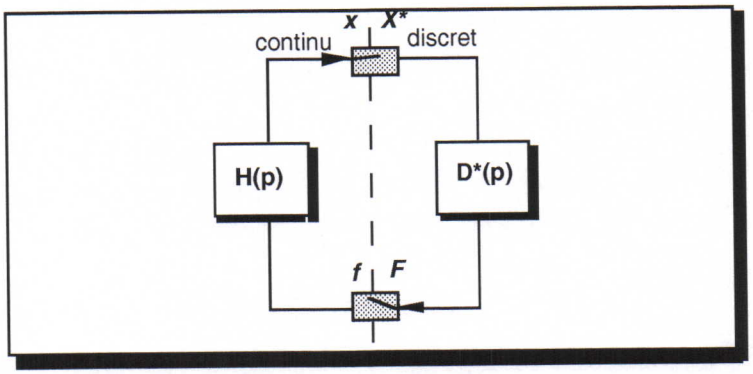


Figure 6.12: *Boucle de couplage utilisateur/simulation*

Le système ainsi transformé nous permet d'écrire la fonction de transfert du système ainsi défini en boucle fermée du couplage utilisateur/simulation à travers le dispositif de manipulation :

$$G(p) = \frac{D(p).e^{-pT}}{1 + H(p)D(p).e^{-pT}} \qquad \text{(Eq. 6.1)}$$

avec $$H(p) = \frac{1}{(m_{op} + m_h + m_m).p^2 + (b_{op} + b_h + b_m).p + (k_{op} + k_h)} \qquad \text{(Eq. 6.2)}$$

D(p) représente la fonction de transfert de l'environnement simulé.

Puisque nous somme en présence de deux environnements temporels différents. L'échantillonnage fait intervenir un retard pur $e^{-\tau p}$ (simulation et bloqueur d'ordre zéro).Le développement limité de ce retard est le suivant :

$$e^{-pT} = 1 - p.T + \frac{1}{2}.p^2.T^2 \qquad \text{(Eq. 6.3)}$$

La condition de stabilité est que la partie réelle des pôles de G(p) soit inférieure à zéro.

$$1 + H(p)D(p).e^{-pT} = 0 \qquad \text{(Eq. 6.4)}$$

$$1 + H(p)D(p).(1 - p.T + \frac{1}{2}.p^2.T^2) = 0 \qquad \text{(Eq. 6.5)}$$

Posons $M = m_{op} + m_h + m_m$

$B = b_{op} + b_h + b_m$

$K = k_{op} + k_h$

Alors $$M.p^2 + B.p + K + D(p).(1 - p.T + \frac{1}{2}.p^2.T^2) = 0 \qquad \text{(Eq. 6.6)}$$

Exemple : cas ou nous simulant une raideur, D(p)=k_{sim}

$$M.p^2 + B.p + K + k_{sim}.(1 - p.T + \frac{1}{2}.p^2.T^2) = 0 \qquad \text{(Eq. 6.7)}$$

$$(M + \frac{1}{2}.k_{sim}.T^2)p^2 + (B - k_{sim}T).p + K + k_{sim} = 0 \qquad \text{(Eq. 6.8)}$$

$$r1, r2 = \frac{-(B - k_{sim}T) \pm \sqrt{(B - k_{sim}T)^2 - 4.(M + \frac{1}{2}.k_{sim}.T^2).(K + k_{sim})}}{2.(M + \frac{1}{2}.k_{sim}.T^2)} \qquad \text{(Eq. 6.9)}$$

L e système est stable pour :

$$-(B - k_{sim}T) < 0 \Rightarrow T > \frac{B}{k_{sim}} \qquad \text{(Eq. 6.10)}$$

Ceci est une solution approximative, la solution réelle est de la forme $T < c.\frac{B}{k_{sim}}$ où c est une constante généralement égale à 2.

La constante c peut être déterminée par un calcul plus précis en utilisant les transformé en z. Colgate [Col94] a démontré un théorème sur les conditions de stabilité dépendant de l'environnement simulé.

Une condition nécessaire et suffisante pour la passivité des données échantillonnées est la suivante :

$$B > \frac{T}{2}.\frac{1}{1-\cos(wT)}.\mathrm{Re}\left\{(1-e^{-jwT}).H(e^{jwT})\right\} \qquad \text{(Th.1)}$$

avec $0 \le \omega \le \omega_N$ et $\omega_N = \frac{\pi}{T}$ représente la fréquence de Nyquist

Si on pose $H(z)=k_{sim}$ où $k_{sim} > 0$ représente la raideur virtuelle d'où d'après Th.1 on obtient :

$$B > \frac{T}{2}.\frac{1}{1-cos(wt)}.Re\left\{(1-e^{-jwt}).k_{sim}\right\} \qquad \text{(Eq. 6.11)}$$

Nous avons $Re\left\{(1-e^{-jwt}).k_{sim}\right\} = Re\left\{(1-cos(wt)-i.sin(wt)).k_{sim}\right\}$ (Eq. 6.12)

Par suite $Re\left\{(1-e^{-jwt}).k_{sim}\right\} = (1-cos(wt)).k_{sim}$ (Eq. 6.13)

Alors nous trouvons le même résultat que précédemment $T < c.\frac{B}{k_{sim}}$.

7. Mise au point de l'expérience

L'interaction gestuelle dans nos expériences se fait à travers le clavier rétroactif modulaire (CRM). Pour certaines expériences nous utilisons des habillages mécaniques montés sur le clavier.

Pour la visualisation nous avons utilisé un écran 21 pouces (1280 points x 1024 points).

La disposition du clavier, de l'écran et de l'opérateur est donnée par le schéma de la *figure 6.13*. L'opérateur est placé de telle façon que son coude soit au même niveau que les touches du clavier pour diminuer la fatigue au cours de l'expérience.

L'écran est en face de l'opérateur à *~60 cm*. Le clavier est placé à *~120 cm* du sol. Un cache est disposé au-dessus du clavier pour cacher la main de l'opérateur lors de la manipulation.

Le dispositif expérimental est disposé de telle façon que les droitiers et les gauchers aient les mêmes conditions expérimentales.

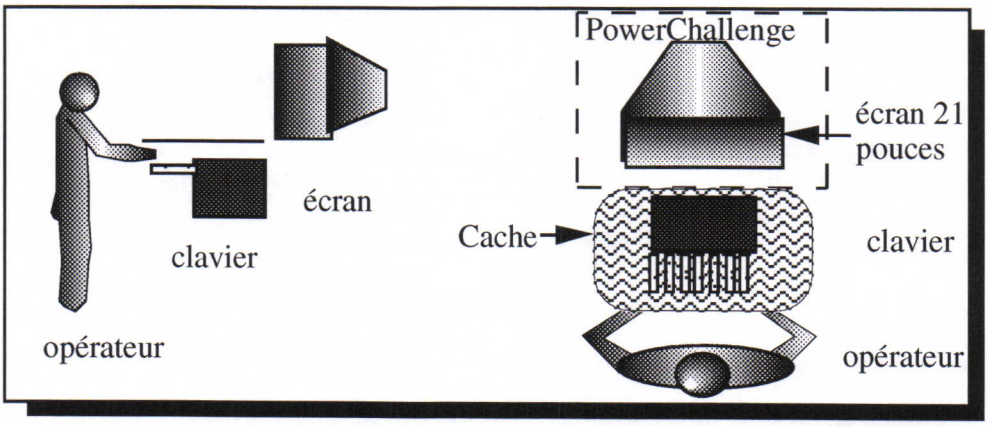


Figure 6.13 : *Vue de côté et de dessus du dispositif expérimental*

8. La notion d'instrument hybride réel-virtuel

Grâce aux systèmes à retour d'effort et à la simulation numérique des objets physiques, il est possible d'effectuer une grande variété de tâches en plaçant l'opérateur face à un instrument. L'instrument est une combinaison de capteurs, effecteurs et d'habillages mécaniques réels et de composants virtuels provenant d'une simulation.

Dans le cas où les contraintes des interfaces gestuelles sont imposées, il peut être difficile d'établir une exacte correspondance entre les propriétés géométrico-dynamiques du dispositif manipulé et celles de l'espace virtuel où la tâche s'opère. L'introduction du composant virtuel a pour but de rendre plus flexible la morphologie de l'instrument pour mieux l'adapter à l'interaction instrumentale et, dans le cas général, permettre de concevoir la chaîne instrumentale (réelle-virtuelle) réalisant la meilleure adéquation entre les performances humaines et les contraintes imposées par la tâche.

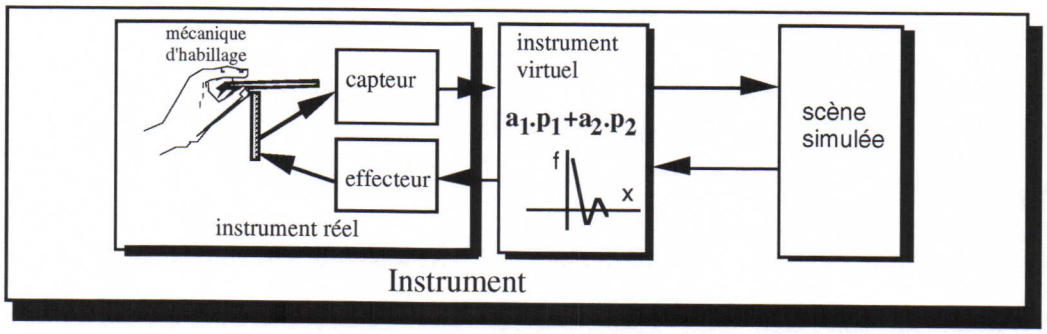


Figure 6.14 : *Décomposition de l'instrument de manipulation en partie réelle et en partie virtuelle.*

En résumé, nous pouvons dire que le dispositif gestuel est composé d'une partie physique réelle et d'une partie physique simulée. La partie physique constitue la partie mécanique réelle du dispositif constitué des capteurs et des effecteurs et des morphologies d'habillages.

La partie virtuelle contient des composants logiciels permettant de changer le comportement du dispositif physique. Les chapitres suivants montreront un grand nombre d'exemples de réalisations d'instruments hybrides.

9. Conclusion

Dans les paragraphes qui précédent nous avons décrit le matériel utilisé et quantifié ces performances. Nous avons donc un système à retour d'effort permettant de simuler jusqu'à 16 degrés de liberté séparés. Ces degrés de liberté peuvent être couplés à l'aide d'habillages mécaniques. L'architecture machine nous permet de réaliser des simulations à *1050 Hz*. Les forces délivrées par le système à retour d'effort sont d'environ *20 N* au bout de la touche sur laquelle viennent se fixer les habillages. De plus Le geste est mesuré avec une précision de *3 µm* lorsque le moteur est activé. L'inertie minimale simulable est d'environ *180 g*.

Après cette étude du dispositif à retour de force, son calibrage et la réalisation de la partie logicielle, nous pouvons envisager nos expérimentations sur les anamorphoses de situations instrumentales multisensorielles.

Chapitre 7

Expériences Préliminaires

1. Analyse de la manière de tenir de l'opérateur

Les caractéristiques de l'opérateur sont difficiles à déterminer, mais nous pouvons avoir un aperçu de son comportement pour des situations bien déterminées. L'influence de l'opérateur dans la boucle action-perception n'est pas négligeable. L'environnement virtuel stable peut devenir instable au moment de l'interaction avec l'utilisateur. Cette instabilité peut être introduite par la manière dont l'utilisateur tient la touche. En effet, l'utilisateur est un système physique et le système physique résultant est constitué de deux systèmes physiques en interaction {opérateur humain <-> touche à retour d'effort} et {touche à retour d'effort<->objet simulé}. Le comportement de l'ensemble dépend des caractéristiques dynamiques de chacun des système en présence et de leur interaction. Dans ce qui suit nous avons réalisé une expérience pour montrer l'influence de la manière dont est tenu le dispositif à retour d'effort sur la stabilité du système.
Dans cette expérience l'utilisateur manipule une seule touche. Dans la première situation, il maintient la touche avec deux doigts. Dans l'autre, il maintient la touche avec un seul doigt *(figure 7.1)*.

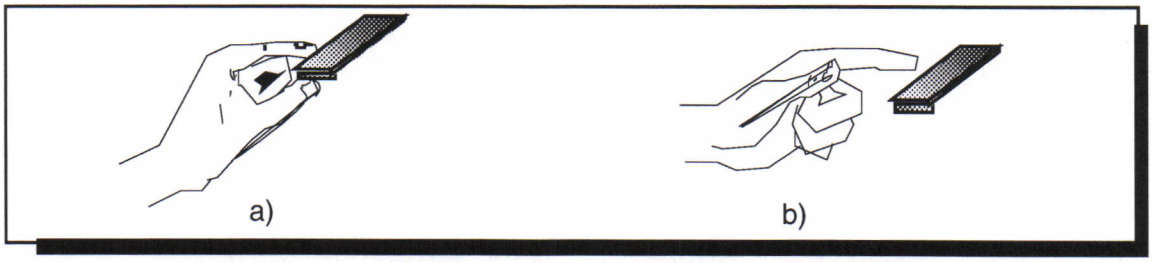


Figure 7.1 : *les deux manières de manipuler la touche*

Les caractéristiques des modèles manipulés *(figure 7.2)* sont les suivantes :

- la scène simulée est composée de deux masses : Diamètre masse1 = 0,1 (en unité algorithmique, dans notre cas ≅ 1 cm); Diamètre masse2 = 50

- la fonction d'interaction entre les deux masses est une fonction de non - pénétration viscoélastique *(cf. Annexe C)*; Raideur de l'interaction $K_{Algo} = 5.e^{-3}$ (Valeur algorithmique, valeur physique ≅ 5,2 N/cm); Viscosité de l'interaction $Z_{Algo} = 2.e^{-4}$ (≅ 220 N.s/cm^2).

- la masse est couplée à la touche par une interaction visco-élastique comme décrit dans la *figure 7.4.*

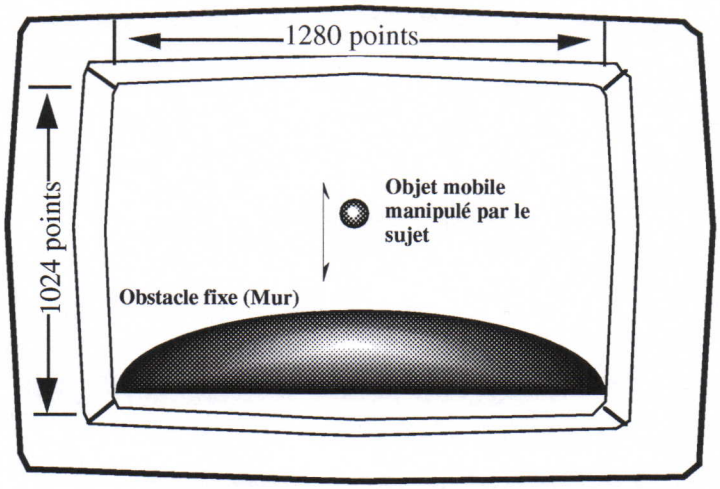


Figure 7.2 : *Scène mise en oeuvre pour l'expérience*

De la *figure 7.3,* nous pouvons déduire que dans la situation où l'opérateur manipule la touche avec deux doigts, le système est plus stable que dans la situation où il manipule la touche avec un seul doigt. Cette situation est valable pour notre cas où nous captons la position de la touche. Dans la situation où nous avons un capteur de forces à la place d'un capteur de positions, ceci n'est plus vrai, car l'opérateur devrait diminuer la force qu'il applique sur la touche pour la stabiliser.

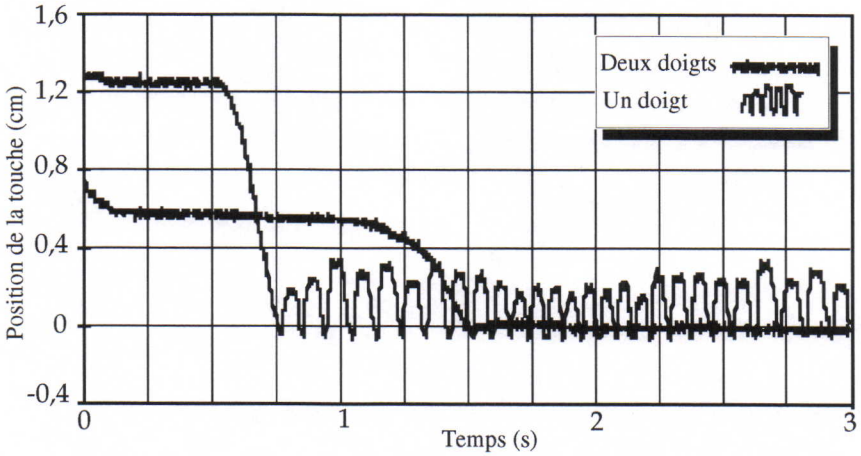


Figure 7.3 : *Variation de la position pour les deux méthodes de maintient de la touche par l'utilisateur.*

2. Expérience sur la sensibilité de l'utilisateur à la raideur

Dans cette expérience nous allons déterminer les seuils différentiel et absolu pour la raideur dans le cas où la touche est maintenue par le pouce et l'index.

Nous avons réalisé l'expérience avec trois sujets.

Deux touches du clavier sont utilisées pour la stimulation du sujet, chacune simulant une viscoélasticité caractérisée par une raideur, une viscosité et la masse de la touche *(figure 7.4.b)*.

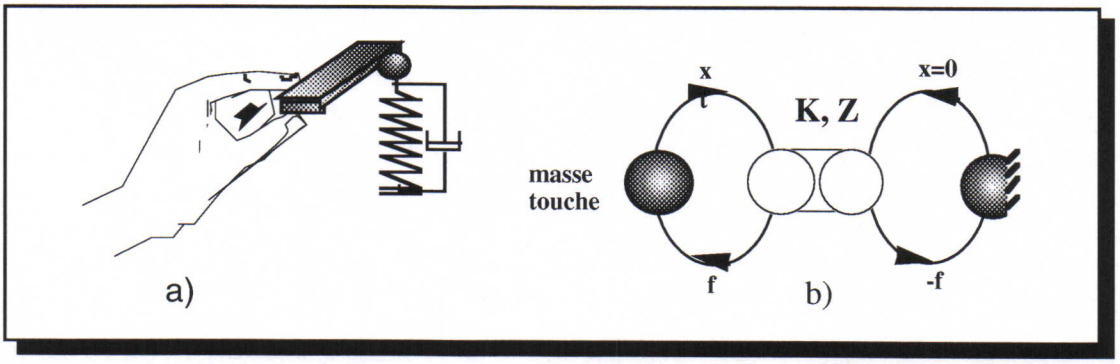


Figure 7.4 : *Méthode de saisie employée et modèle Cordis-Anima simulé*

Comme nous l'avons dit précédemment, la touche est connectée à un sol simulé via une interaction visco-élastique simulée. Dans une première expérience nous avons déterminé le seuil différentiel pour la raideur. Dans une deuxième expérience nous avons déterminé le seuil absolu pour ces mêmes grandeurs physiques.

2.1. Détermination du seuil différentiel

Pour la réalisation de cette expérience, nous avons utilisé la méthode des stimuli constants décrite dans *(§Chapitre 2.2.1)*. Nous avons présenté dans un ordre imprévisible pour le sujet une série de raideurs à comparer avec la raideur de référence. Nous avons répété cette expérience pour trois valeurs de raideur de référence (faible, moyenne et grande).

Le sujet répond par "moins grand" (-), "plus grand" (+) ou "égal" (absence de perception de différence), et nous avons accepté des réponses intermédiaires, telle que "moins grand douteux" (-?) et "plus grand douteux" (+?) qui seront comptées pour moitié d'une réponse de même signe non douteuse. Dès les premières expériences, les sujets éprouvaient parfois des difficultés à discerner entres les deux types de signaux, d'où l'utilisation de cette méthode moins brutale.

Cependant en définitive, il faudra comparer seulement la fréquence des réponses "plus grand" à celles des réponses "égal" pour le calcul du seuil différentiel supérieur et la fréquence des réponses "plus petit" à celles des réponses "égal" pour le calcul du seuil différentiel inférieur. Pour résoudre cette difficulté, on considère que deux réponses contradictoires (plus petit et plus grand) équivalent à l'incapacité de distinguer la différence présentée ; on remplace donc les réponses contradictoires par un nombre équivalent de réponses "égal". Ainsi, pour la raideur 5,00 N/cm une réponse (-) annule une réponse (+), et les deux sont remplacées par deux réponses "égal".

stimulus variable (N/cm)	4,25	4,50	4,75	5,00	5,25	5,50	5,75	6,00	6,25	6,50
1re série	-	-(?)	-(?)	-(?)	=	+	+	+(?)	+	+
2e série	-	-	=	=	+(?)	+(?)	+(?)	+	+	+
3e série	-	-	-	=	=	+	+(?)	+	+	+
4e série	-	-	=	=	-	+(?)	+	+	+	+
5e série	-	-	-(?)	=	=	+	+	+	+	+
6e série	-	-	-	=	=	=	+	+	+	+
7e série	-	-	-(?)	=	+(?)	+(?)	+(?)	+	+	+
8e série	-	-(?)	-(?)	=	+(?)	+(?)	+	+	+	+
9e série	-	-	=	=	=	-(?)	+	+	+	+
10e série	-	-	-(?)	=	+(?)	+	+	+	+	+
Nb. réponses (+)	0	0	0	0	2	6	8,5	9,5	10	10
Nb. réponses (-)	10	9	4,5	0,5	1	0,5	0	0	0	0
Nb. réponses (=)	0	1	5,5	9,5	7	3,5	1,5	0,5	0	0

***Tableau 7.1** : Réponses du Sujet A pour une raideur de référence de 5 N/cm*

Pour l'ensemble des résultats, on aboutit à la répartition suivante pour chaque valeur de stimulus variable :

Stimulus variable (N/cm)	4,25	4,50	4,75	5,00	5,25	5,50	5,75	6,00	6,25	6,50
Réponse (-)	10	9	4,5	0,5	0	0	0	0	0	0
Réponse (+)	0	0	0	0	1	5,5	8,5	9,5	10	10
Réponse (=)	0	1	5,5	9,5	9	4,5	1,5	0,5	0	0

***Tableau 7.2** : Réponses obtenues après traitements*

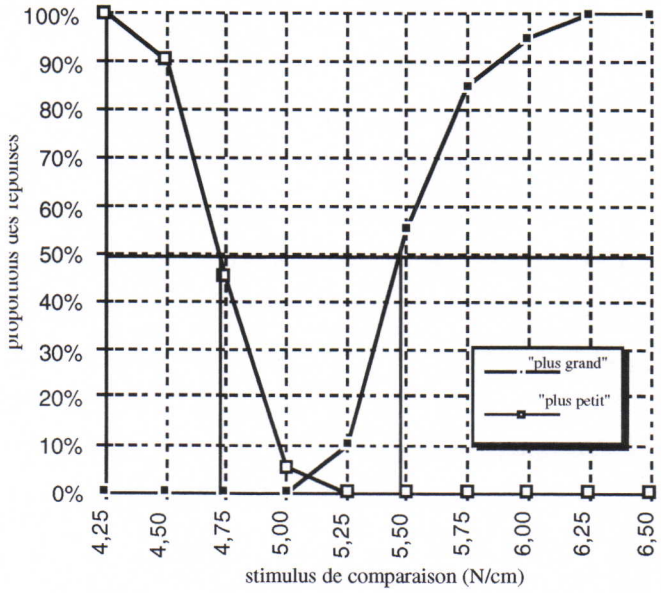


***Figure 7.5** : Les courbes sigmoïdes pour les stimuli "plus grand" et "plus petit" pour le sujet A pour une raideur de référence de 5 N/cm*

A partir de la lecture des deux valeurs liminaires inférieure et supérieure sur les courbes *(figures 7.5 à 7.13)*, nous pouvons déterminer le seuil différentiel qui est égal à leur demi-différence.

$$seuil\ \ différentiel = \frac{5,45 - 4,70}{2} = 0,375\ \ N/cm$$

le point d'égalisation subjective *(PEgS)* est égal à leur demi-somme :

$$PEgS = \frac{5,45 + 4,70}{2} = 5,075\ \ N/cm$$

Fraction de Weber :

$$\frac{\Delta I}{I} = \frac{0,375}{5,075} = 7,40\ \ \%$$

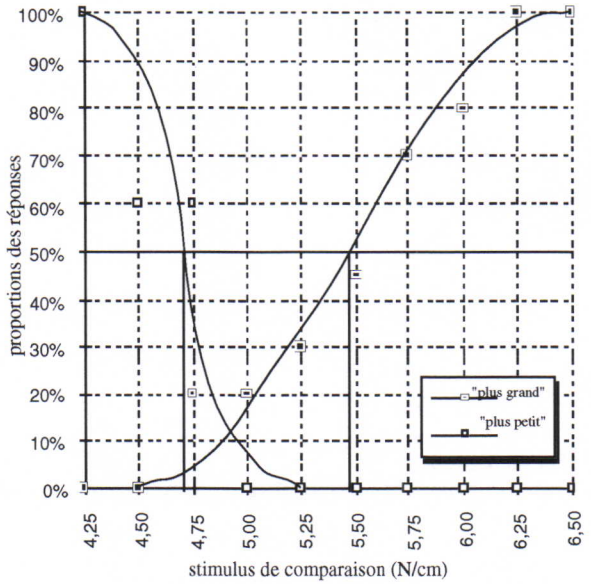


Figure 7.6: *Les courbes sigmoïdes pour les stimuli "plus grand" et "plus petit" pour le sujet B pour une raideur de référence de 5 N/cm*

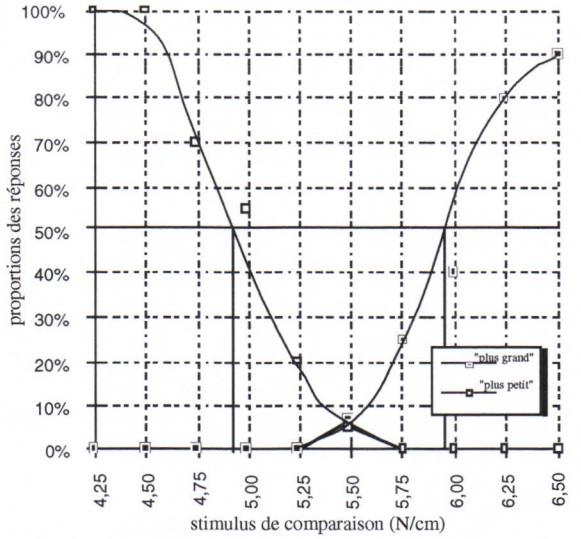


Figure 7.7 : *Les courbes sigmoïdes pour les stimuli "plus grand" et "plus petit" pour le sujet C pour une raideur de référence de 5 N/cm*

	ΔI (N/cm)	I (N/cm)	ΔI/I
Sujet A	0,375	5,075	7,4 %
Sujet B	0,375	5,075	7,4 %
Sujet C	0,50	5,56	9%

Tableau 7.3: *Valeurs des seuils différentiels pour les 3 Sujets pour une raideur de référence de 5 N/cm*

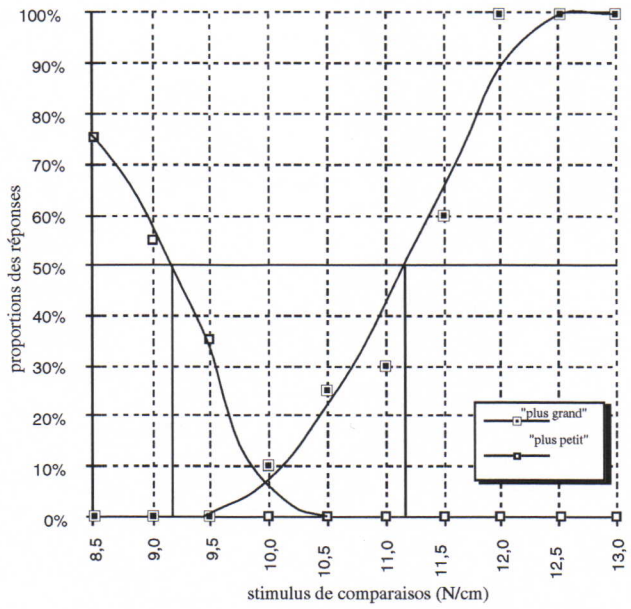


Figure 7.8 : *Les courbes sigmoïdes pour les stimuli "plus grand" et "plus petit" pour le sujet A, pour une raideur de référence de 10 N/cm*

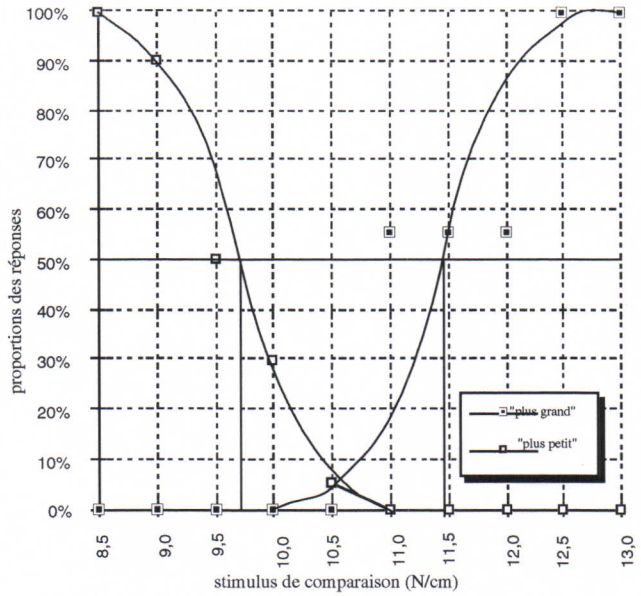


Figure 7.9: *Les courbes sigmoïdes pour les stimuli "plus grand" et "plus petit" pour le sujet B pour une raideur de référence de 10 N/cm*

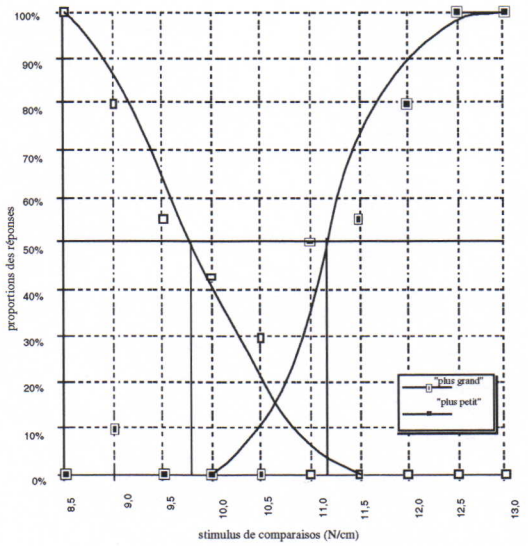


Figure 7.10: *Les courbes sigmoïdes pour les stimuli "plus grand" et "plus petit" pour le sujet C pour une raideur de référence de 10 N/cm*

	ΔI (N/cm)	I (N/cm)	ΔI/I
Sujet A	1	10,2	9,8 %
Sujet B	0,85	10,55	8 %
Sujet C	0,75	10,45	7 %

Tableau 7.4: *Valeurs des seuils différentiels pour les 3 Sujets pour une raideur de référence de 10 N/cm*

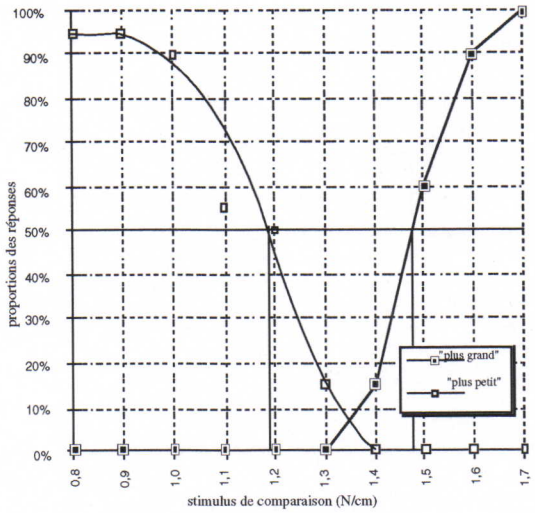


Figure 7.11 : *Les courbes sigmoïdes pour les stimuli "plus grand" et "plus petit" pour le sujet A pour une raideur de référence de 1,2 N/cm*

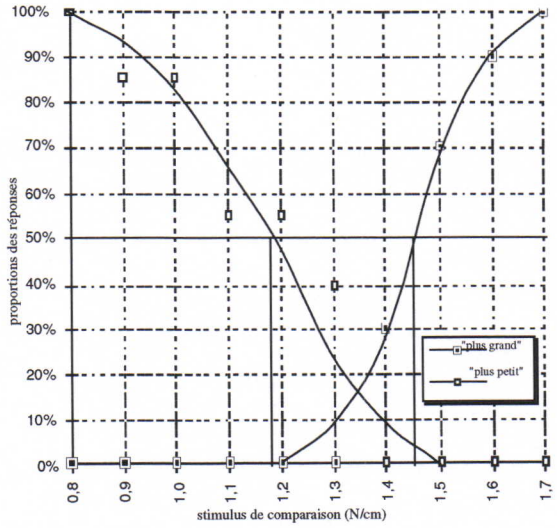


Figure 7.12 : *Les courbes sigmoïdes pour les stimuli "plus grand" et "plus petit" pour le sujet B pour une raideur de référence de 1,2 N/cm*

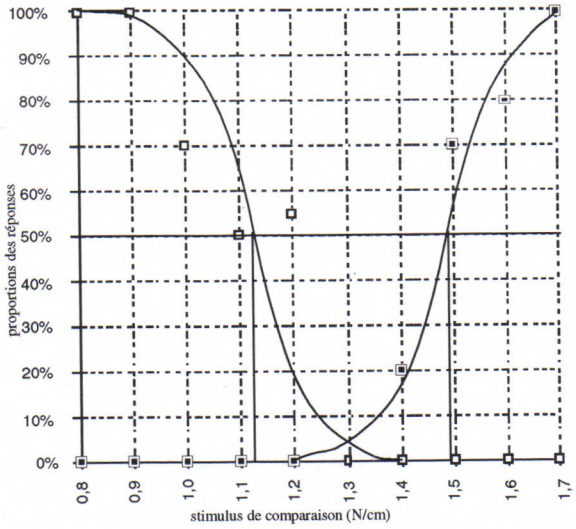


Figure 7.13 : *Les courbes sigmoïdes pour les stimuli "plus grand" et "plus petit" pour le sujet C pour une raideur de référence de 1,2 N/cm*

	ΔI (N/cm)	I (N/cm)	ΔI/I
Sujet A	0,145	1,335	10,8 %
Sujet B	0,135	1,315	10,3 %
Sujet C	0,185	1,305	14,2 %

Tableau 7. 5 : *Valeurs des seuils différentiels pour les 3 Sujets pour une raideur de référence de 1,2N/cm*

Référence	1,2 (N/cm)	5 (N/cm)	10 (N/cm)
ΔI/I	7,5 %	8 %	10,8 %

Tableau 7.6 : *Valeurs des fractions de Weber pour les différentes raideurs de références.*

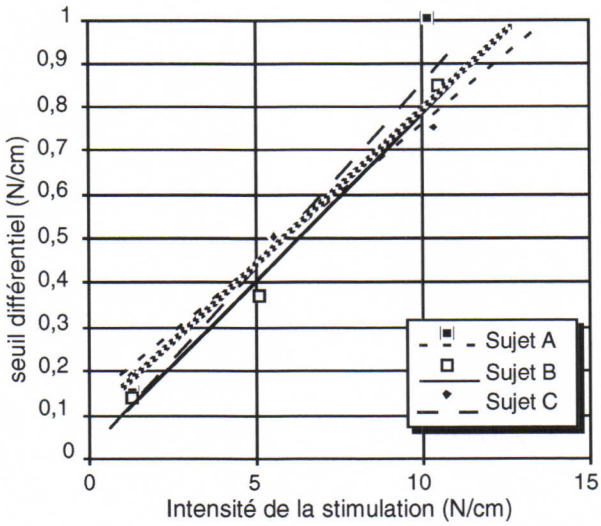


Figure 7.14 : *Fonction qui suit la répartition de la loi de Weber*

Des droites de la *figure 7.14* nous déduisons la loi de Weber de la forme :

$$\frac{\Delta I}{I+0,1} = 8\ \%$$

avec

ΔI seuil différentiel

et I, intensité de la stimulation.

2.2. Détermination du seuil absolu

Pour déterminer le seuil absolu, nous avons utilisé la méthode des limites. Nous avons réalisé plusieurs séries de mesures (10 séries) dans lesquelles on a fait varier la raideur d'une valeur non-perceptible par l'opérateur (0 N/cm) à une valeur perceptible (0,2 N/cm) et inversement. La valeur obtenue n'est pas assez précise parce qu'elle est entachée par le bruit provoqué par le frottement de la touche et par le temps de refroidissement du moteur (d'un essai à l'autre, il peut apparaître une raideur rémanente).

Pour cette mesure, nous avons pris la valeur de raideur pour laquelle le sujet répond toujours par oui à la question : "perçois-tu une raideur". Cette valeur est d'environ 0,1 N/cm.

3. Conclusion

Dans ces expériences, un bruit moteur gène les sujets pour la raideur d'environ 10 N/m, et nous étions à la limite de la stabilité du modèle simulé. De plus à certaines positions de la touche, les sujets perçoivent des à-coups dus à des forces de repliement. Par contre pour les

faibles raideurs, les sujets étaient perturbés par le frottement des touches (~0,05 N), ce qui a limité notre expérience à une petite valeur de raideur de 1N/cm.

La mesure du seuil différentiel relatif à la raideur a été effectuée par Jones et Hunter [Jon90] qui ont estimé le seuil différentiel de la raideur à 23% pour des mesures réalisés au niveau du poignet. En ce qui nous concerne, nos mesures sont effectuées entre le pouce et l'index (le poignet est libre) et nous trouvons un seuil différentiel de ~10 %. Nous pensons qu'il y a une intervention de la perception tactile en plus de la perception kinesthésique, d'où l'amélioration de la précision. A noter que le seuil de discrimination tactile est de 5 % [Bus82].

Le seuil absolu dépend largement du dispositif d'expérimentation utilisé. Dans notre cas nous avons obtenu un seuil absolu de 0,1 N/cm, ceci avec un frottement faible mais perceptible par les sujets.

Il serait intéressant de refaire les mêmes expériences pour la viscosité et la masse. Pour cela, il faudrait utiliser un capteur de position pour l'expérience sur la masse et un capteur de vitesse pour la mesure de la viscosité. La structure actuelle de l'interface gestuelle que nous avons utilisée pour nos prospections ne permet pas la simulation d'une inertie pure par le formalisme de CORDIS-ANIMA. La simulation d'une inertie se fait approximativement en simulant une inertie couplée au dispositif gestuel à travers une liaison viscoélastique de raideur importante. Dans ce cas, la mesure du seuil différentiel d'une inertie sera inexacte, vu qu'il est biaisé par l'élasticité de la liaison.

Cette expérience nous permet aussi de conclure que la précision nécessaire pour fournir une force par un dispositif à retour d'effort dépendra des grandeurs pour lesquelles le dispositif est réalisé. Par exemple, pour les tâches de faible déplacement nécessitant de la précision, la raideur est faible (d'environ 1 N/cm, pour les simulateurs chirurgicaux de l'oeil [But95]) et il est nécessaire que le dispositif puisse simuler des raideurs avec une très grande précision d'environ 0,05 N/cm. Par contre pour des dispositifs destinés à la télémanipulation (300 N) des précisions d'environ 20 N peuvent être suffisantes.

Chapitre 8

Expérience sur l'anamorphose

Cette expérience a pour objectif d'étudier la relation entre le geste et la vision dans différentes situations d'anamorphose et dans le contexte de la situation instrumentale multisensorielle informatisée décrite dans le *Chapitre 5*.

Il s'agit dans cette expérience de déplacer un curseur sur un seul degré de liberté pour effectuer une tâche de positionnement. Le sujet agit sur une touche du dispositif de manipulation gestuelle décrit dans le *Chapitre 6* pour déplacer ce curseur.

En ce qui concerne l'anamorphose dans la manipulation, les manières de déplacer le curseur sont au nombre de trois :

- Déplacement rectiligne vertical du curseur exactement corrélé aux déplacements de la touche à retour d'effort.
- Déplacement rectiligne horizontal du curseur avec un déplacement de la touche dans une direction orthogonale.
- Déplacement rotatif du curseur pour un déplacement rectiligne de la touche.

Dans cette expérience nous demandons au sujet de se déplacer le plus précisément possible vers la cible. Cette cible lui est signalée soit par un retour de force soit par un retour visuel. La position de la cible varie aléatoirement d'un essai à l'autre. À la fin de chaque essai, on mesure la durée du mouvement pour atteindre la cible et la distance du curseur par rapport à la cible. Ces deux paramètres représentent *la performance* du sujet.

Dans toutes les situations expérimentales, le déplacement du curseur est visible à l'écran ; par contre la cible ne l'est pas dans toutes les situations.

En ce qui concerne l'anamorphose dans les retours visuels et gestuels, pour chacune des situations, nous avons défini cinq conditions expérimentales :

- perception visuelle de la cible sans retour d'effort ;
- cible non-visible avec retour d'effort avec une raideur de valeur moyenne (5 N/cm) ;
- cible visible avec retour d'effort (5 N/cm) ;
- cible non-visible avec force d'interaction faible (1 N/cm) ;
- cible visible avec retour d'effort important (10 N/cm).

La situation de référence à partir de laquelle toutes les autres seront qualifiées d'anamorphosées sera celle où le déplacement de la touche correspond exactement à celui du curseur et où l'on a tous les retours visuels et gestuels.

Une première observation immédiate est que lorsque la cible est non-visible, les performances (précision et rapidité) s'améliorent en augmentant la raideur.

Un deuxième résultat immédiat est que dans la situation où l'anamorphose est importante (potentiomètre rotatif), la perception gestuelle seule (sans retour visuel) donne des résultats meilleurs qu'avec retours visuel et gestuel simultanés.

Dans ce chapitre, nous allons décrire les différentes expériences et les résultats obtenus. Nous commencerons par décrire le protocole d'expérimentation général puis les différentes situations expérimentales.

1. But de l'expérience

Le but principal de cette expérience est de comprendre l'influence de l'anamorphose par rapport à la situation de référence donnée ci-dessus sur les performances humaines, et ceci dans le cas où il n'y a pas corrélation entre le geste réalisé et le retour visuel ou gestuel perçus dans une tâche de positionnement à un seul degré de liberté.

Un autre objectif de cette expérience est de comprendre l'apport du retour d'effort par rapport au retour visuel. Ainsi, il semble de mise de croire que les performances soit améliorées en présence d'un retour d'effort judicieusement contrôlé. Nous pensons que ces a-priori sont à étayer et que les outils matériels et de simulation nouveaux sont à même d'apporter des informations nouvelles et objectives sur ce point.

La première discussion des résultats aura pour but de comprendre l'effet de l'anamorphose dans chacune des situations expérimentales. Nous discuterons ensuite de l'effet de l'augmentation de la raideur sur les performances du sujet, puis de l'effet du retour visuel sur chaque type de déplacement, et enfin nous discuterons l'effet de la variation de distance de la cible par rapport au curseur et nous vérifierons les lois de Fitts et Meyer.

2. Méthode expérimentale

Dans toutes les expériences, le sujet doit s'approcher le plus précisément possible de la cible. Dans toutes les situations expérimentales la position de la touche est visualisée à l'écran. La cible est présentée soit visuellement, soit par un retour de force géré par une fonction d'interaction de non-pénétration.

2.1. Sujets

Trois individus travaillant au Laboratoire ont réalisé l'expérience. Les sujets A et B sont droitiers et le Sujet C est gaucher. Tous les sujets sont normaux et n'ont aucun déficit visuel ou moteur connu.

2.2. Appareillages

Pour la commande gestuelle nous avons utilisé le système à retour d'effort décrit au *Chapitre 6*. L'organisation de l'expérience est réalisée suivant la *figure 6.13*.

Pour cette expérience nous utilisons deux touches du clavier. Une première touche pour déplacer le curseur (le déplacement de *3 cm* de la touche correspond au déplacement de *90°* pour le bouton rotatif et de *21 cm* pour les potentiomètres rectilignes) et une deuxième pour arrêter le chronomètre, la disposition de ces deux touches étant adaptée en fonction de la main dominante du sujet. Un écran *21* pouces est utilisé pour la visualisation.

2.3. Les modèles de scènes virtuelles utilisées

Pour chacune de ces tâches, le couplage entre le dispositif de manipulation gestuelle et le modèle simulé se fait à travers différents types de "Module de Point de Vue Relatif" dit MPVR *(figure 8.1)* de CORDIS-ANIMA *(cf. Annexe C)*. Ces modules appartiennent à la scène simulée. Une de leur fonctionnalité essentielle est d'effectuer un changement de point de vue généralisé, en effectuant, entre autres, des transformations géométriques ou des transformations d'échelle entre deux parties d'une scène. Nous l'utilisons ici pour effectuer des transformations géométriques ou des transformations d'échelle entre la partie de l'instrument se trouvant dans le monde réel (le système gestuel à retour d'effort équipé de ces interfaces d'habillages) et la partie simulée de l'instrument lorsqu'elle existe.

Les MPVR utilisés dans les expériences suivantes sont au nombre de trois, correspondants à trois scènes :

- Le premier MPVR *(figure 8.1.a)* est le MPVR identité : les positions captées par le dispositif gestuel sont utilisées directement par la simulation sans aucune transformation. Cela signifie que la position et la force utilisées et produites par le simulateur sont directement celles produites et exercées sur la touche. Nous appellerons cette scène "scène 1".

- le deuxième MPVR *(figure 8.1.b)* réalise une inversion d'axe, l'axe des x est transformé en axe y au moment de l'affichage. Nous appellerons cette scène "scène 2".

- Le troisième MPVR *(figure 8.1.c)* effectue une transformation des coordonnées cartésiennes en coordonnées polaires. Il transforme le déplacement rectiligne de la touche en déplacement rotatif. L'utilisateur exerce une action en déplacement vertical alors que la simulation voit une rotation. Une position x entrante dans le module fournira deux valeurs de coordonnées (X, Y), correspondant à une rotation *(figure 8.1.c)*. Nous appellerons cette scène "scène 3"

Les équations de ces différents MPVR ont été décrites dans *l'Annexe C.*

La cible utilisée dans le modèle simulé a une dimension de *1,3 cm.* Elle est modélisée par un sol fixe. Le curseur a un diamètre de 1 cm et ceci pour toute l'expérience. La fonction d'interaction utilisée entre le curseur et la cible est une fonction de non-pénétration décrite à *l'Annexe C.* Tous les objets mis en jeu pour chaque expérience garderont les mêmes caractéristiques pendant toute la durée de celle-ci.

La cible peut prendre sept positions distinctes, la distance entre la position 1 de la cible et la position 7 est de *9,4 cm.* Le curseur se trouve à *3 cm* de la position la plus proche (la position 7).

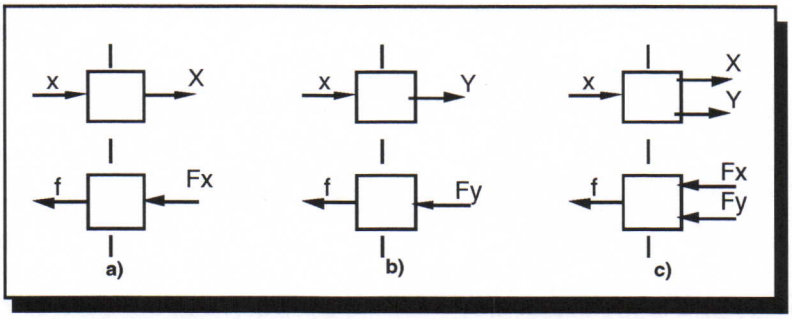


Figure 8.1: *les Modèles de MPVR utilisés*

La *figure 8.2.a* montre la manipulation réelle et la *figure 8.2.b* montre la fonction réalisée par le curseur simulé.

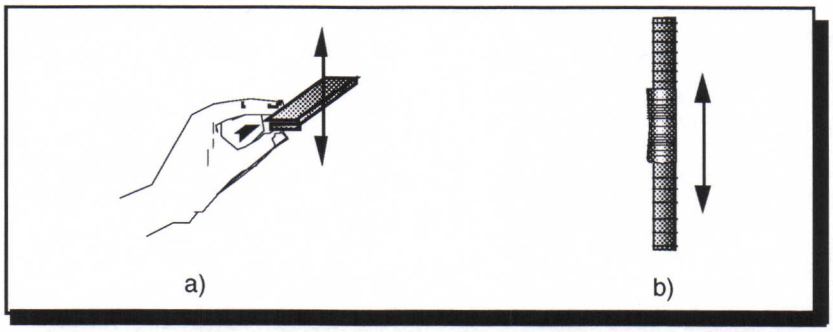


Figure 8.2 : *Potentiomètre rectiligne vertical*

La *figure 8.3* montre le modèle CORDIS-ANIMA de la scène 1. La masse de gauche est connectée à la touche par une interaction viscoélastique. A cette interaction près, elle suivra la touche. Elle représente le curseur. Cette masse est reliée à la cible par une interaction viscoélastique de répulsion *(cf. Annexe C)*. La cible est représentée sur la figure ci-après par les sphères de gauche, une pour chacune des sept positions de la cible.

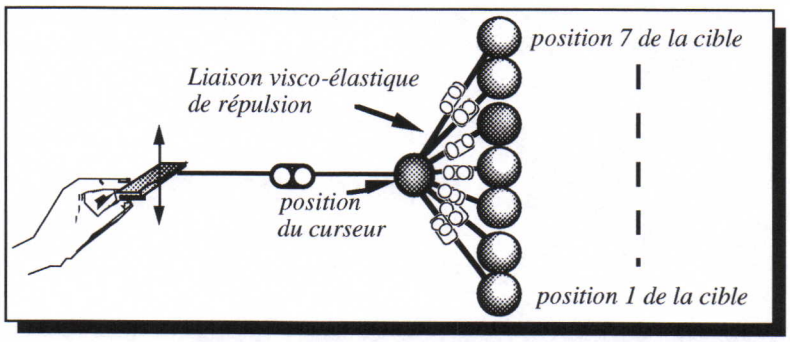


Figure 8.3 : *Modèle Cordis-Anima de la scène 1*

La *figure 8.4* montre la représentation standard de la scène à l'écran. Les sept sphères représentent les 7 positions que peut prendre la cible. Lorsque la cible est visible, une seule de ces positions est visibles.

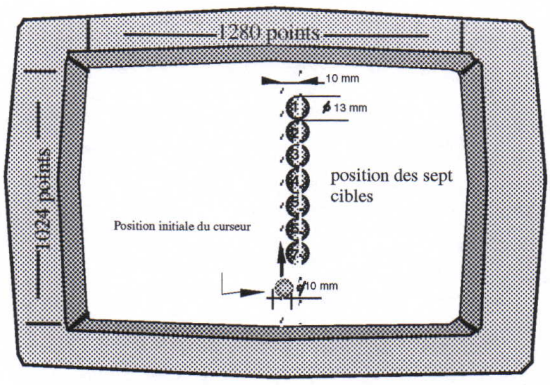


Figure 8.4 : *Représentation de la scène 1 à l'écran*

La *figure 8.5.a* montre la manipulation réelle et la *figure 8.5.b* montre la fonction réalisée par le curseur simulé.

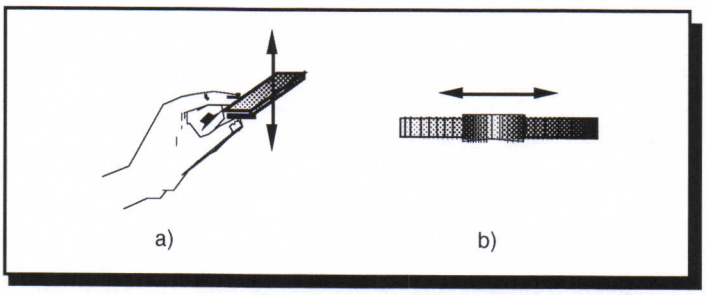


Figure 8.5 : *Potentiomètre rectiligne horizontal*

La *figure 8.6* montre la représentation standard de la scène 2 à l'écran. Les sept sphères représentent les 7 positions que peut prendre la cible. Lorsque la cible est visible, une seule de ces positions est visibles.

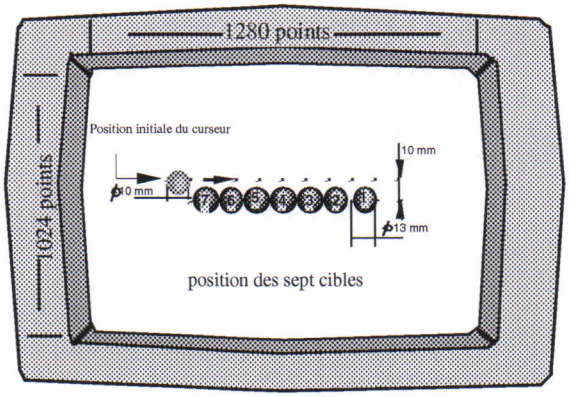


***Figure 8.6** : Modèle de la scène 2 à l'écran*

La *figure 8.7.a* montre la manipulation réelle et la *figure 8.7.b* montre la fonction réalisée par le curseur simulé.

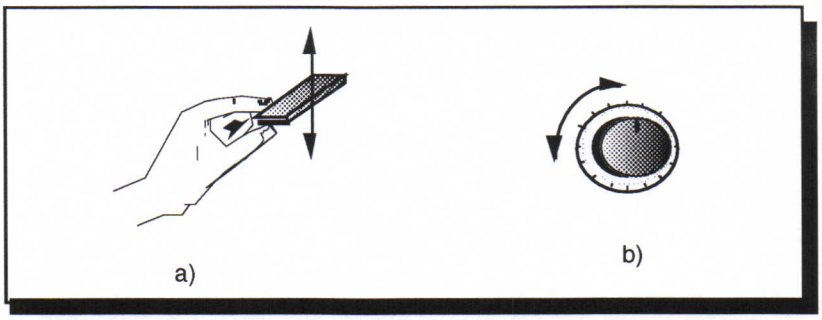


***Figure 8.7** : Potentiomètre rotatif*

La *figure 8.8* montre le modèle CORDIS-ANIMA de la scène 3. La masse centrale est connectée à la touche par une interaction viscoélastique. A cette interaction près, elle suivra la touche. Elle représente le curseur. Cette masse est reliée à la cible par une interaction viscoélastique de répulsion. La cible est représentée sur la *figure 8.8* par les sphères constituant un cercle. Une sphère pour chacune des sept positions de la cible.

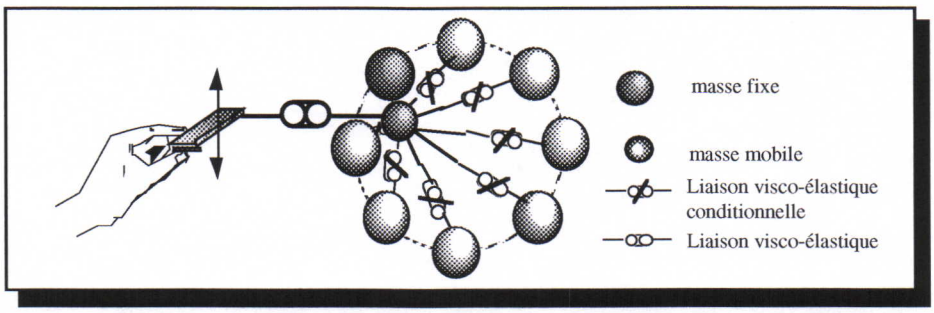


***Figure 8.8** : Modèle Cordis-Anima de la scène 3*

La *figure 8.9* montre la représentation standard de la scène 3 à l'écran. Les sept sphères représentent les 7 positions que peut prendre la cible. Lorsque la cible est visible, une seule de ces positions est visible.

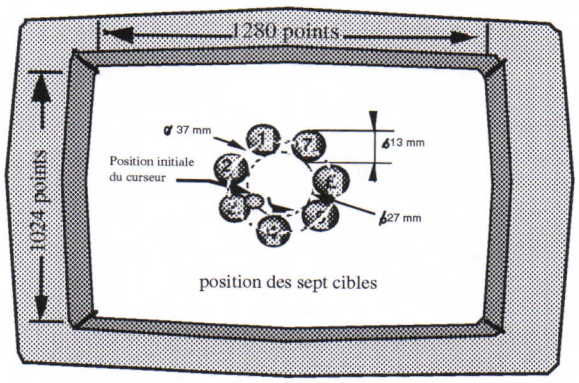


***Figure 8.9** : Représentation à l'écran du modèle manipulé du potentiomètre rotatif*

3. Procédure

3.1. Conduite de l'expérience

Le sujet est assis confortablement devant le dispositif de manipulation gestuel et l'écran de visualisation de telle manière qu'il ne puisse pas être gêné par le support utilisé pour cacher ses mains tenant les touches du dispositif. Avec la main gauche le sujet droitier tient la touche jouant le rôle d'interrupteur mettant fin à l'essai et avec sa main droite, il manipule la touche utilisée pour déplacer le curseur à l'écran (et l'inverse pour le sujet gaucher).

Avant chaque série d'expériences, le sujet effectue quelques essais pour se familiariser avec le matériel et les conditions d'expérimentations.

Le sujet est averti du début de l'expérience par le placement du curseur à sa position initiale à l'écran. C'est à ce moment que nous déclenchons le chronomètre. Le chronomètre est interrompu au moment où le sujet arrête l'essai.

Nous avons réalisé pour chaque expérience 10 séries de sept essais (1 essai pour chaque cible). A la fin de chaque essai nous récupérons le temps effectué et la distance entre le curseur et la cible. La position de la cible est choisie aléatoirement entre sept positions différentes et ceci pour éviter l'apprentissage de la position par le sujet.

3.2. Instructions au sujet

" Votre tâche est de trouver la position de la cible le plus précisément possible, en faisant déplacer le curseur à l'aide de la touche manipulée par votre main dominante. Dès que vous aurez trouvé la position de la cible, appuyez sur la touche d'arrêt".

A la fin de chaque essai nous notons le temps mis par le sujet pour trouver la cible et la distance du curseur par rapport à celle-ci. A la fin de chaque série d'essais l'expérimentateur demande au sujet ses impressions et note ses réflexions.

3.3. Nombre d'essais

On applique ces instructions pour les trois types de visualisations, avec les cinq différentes caractéristiques de la scène :

Situations :

- Potentiomètre rectiligne vertical,
- Potentiomètre rectiligne horizontal,
- Potentiomètre rotatif.

Conditions :

- perception visuelle de la cible sans retour d'effort,
- cible non-visible avec retour d'effort avec une valeur moyenne de la raideur (5 N/cm),
- cible visible avec retour d'effort (5 N/m),
- cible non-visible avec petite force d'interaction (1 N),
- cible visible avec force importante de retour (10 N).

Nombre total d'essais:

- 3 (sujets) x 3 (situations) x 5 (conditions) x 7 (cibles) x 10 (séries) = 3150.

On choisit ici les mêmes caractéristiques physiques (raideur, viscosité) pour toutes les tâches de positionnements.

4. Présentation des résultats

L'analyse des résultats s'est faite suivant quatre phases traitées dans les sous-sections suivantes :

- Dans la première phase on s'intéresse aux performances du sujet dans les trois situations d'anamorphose (une situation de référence et deux situations anamorphosées).
- Dans la deuxième phase on s'intéresse aux performances du sujet en fonction de la variation de la raideur.
- Dans la troisième phase on analyse les performances du sujet en fonction du canal de perception qu'il utilise.
- Dans une quatrième et dernière phase on s'intéresse à la variation des performances du sujet en fonction de la distance de la cible par rapport au curseur, et la vérification des lois de Fitts et Meyer.

4.1. Variation de l'anamorphose

Dans ce paragraphe, nous présentons 30 figures, 10 figures pour chaque sujet. 5 figures donnent l'erreur moyenne de distance et 5 le temps moyen de réalisation de la tâche. Chacune

de ces figures représente une situation expérimentale et contient 3 histogrammes : le premier représente la manipulation sans anamorphose (situation de référence) , le deuxième une anamorphose simple (visualisation orthogonale au geste effectué), le troisième l'anamorphose plus complexe où le déplacement rectiligne est transformé en déplacement rotatif.

Pour toutes les situations et pour tous les sujets, la variation de la durée moyenne de réalisation de la tâche n'est pas significative. La durée de réalisation de la tâche ne semble pas avoir été influencée par les différentes anamorphoses.
Pour une raideur moyenne, les erreurs de positions ne sont pas significatives, par contre en augmentant la raideur, le déplacement horizontal devient plus précis que le déplacement rectiligne vertical et rotatif. Pour les grandes raideurs, l'erreur de position entre le curseur et la cible est toujours positive pour le déplacement rotatif lorsqu'il y a retour d'effort. Nous pensons que ceci est dû au fait que le sujet est plus sensible à la force de répulsion appliquée par la cible sur le curseur. Mais nous avons aussi remarqué que dans le cas du curseur se déplaçant en rotation, le sujet a tendance à ne pas regarder l'écran et à se fier uniquement à sa perception tactilo-kinesthésique.
Pour la condition où la cible est visible et sans retour d'effort, l'erreur de position est plus importante dans le cas d'anamorphose simple. Le problème ici est que les sujets ont tendance à pénétrer la cible en cherchant à avoir le plus possible de surface en commun entre la cible et le curseur, ce qui n'était pas l'objectif. Dans le cas où l'objectif serait d'être le plus prêt du centre de la cible la situation sans anamorphose serait la plus précise. Nous remarquons également que dans le cas où nous avons en même temps un retour de force et un retour visuel, les erreurs de distance et la durée moyenne de réalisation de la tâche sont approximativement les mêmes pour toutes les situations de manipulation.

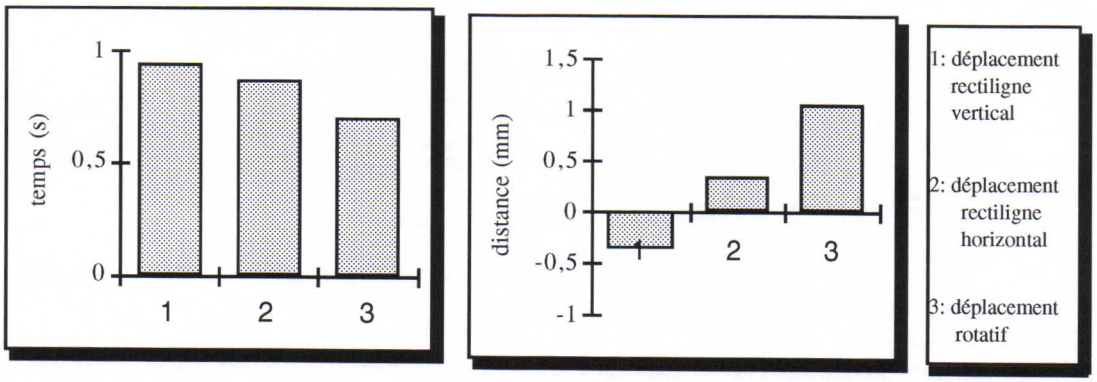


Figure 8.10 : *Histogrammes des durées et des erreurs de distances pour la cible non-visible et une grande raideur, Sujet A.*

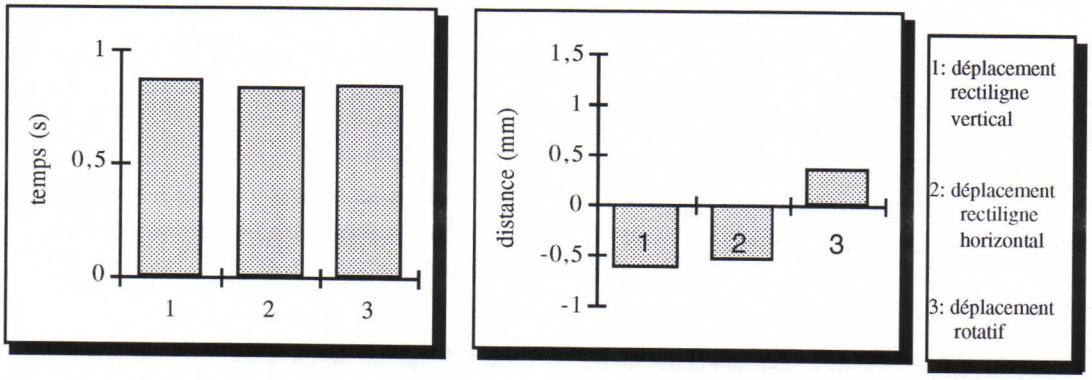


Figure 8.11 : *Histogrammes des durées et des erreurs de distances pour la cible non-visible et pour une grande raideur, Sujet B.*

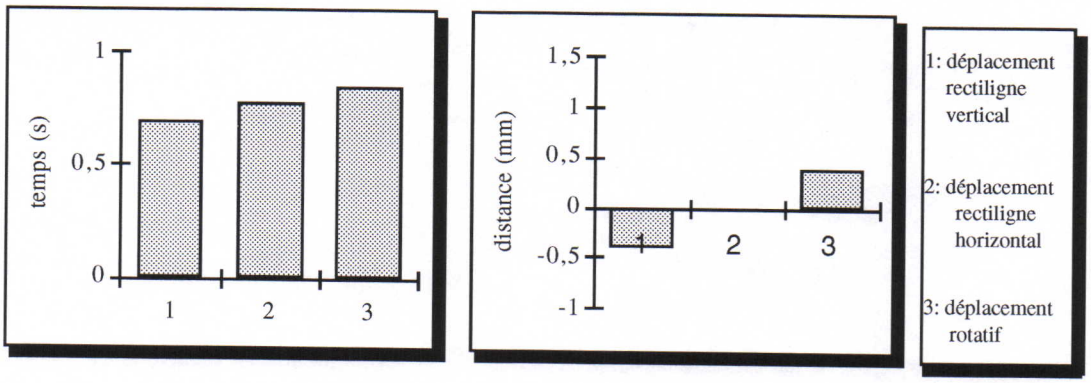


Figure 8.12 : *Histogrammes des durées et des erreurs de distances pour la cible non-visible et une grande raideur, Sujet C.*

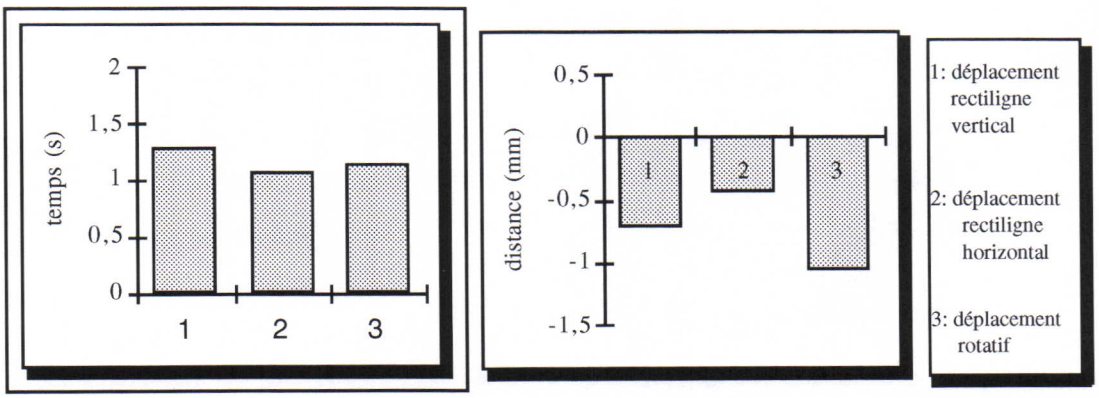


Figure 8.13 : *Histogrammes des durées et des erreurs de distances pour la cible non-visible et une petite raideur, Sujet A.*

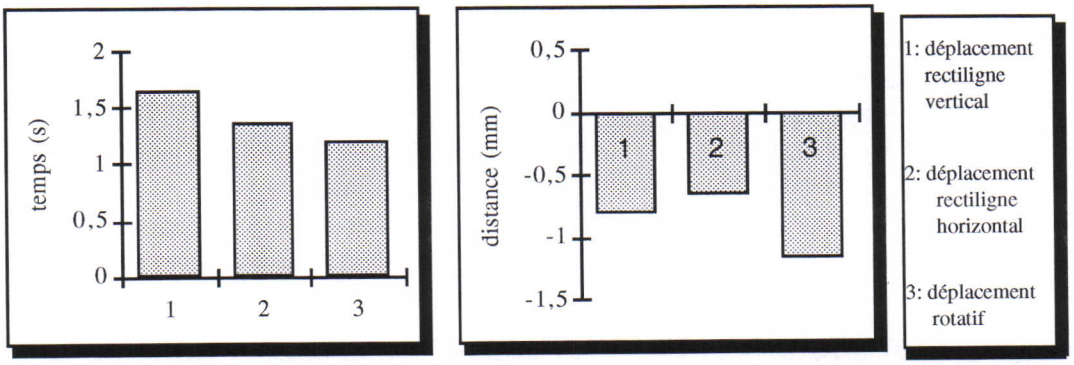


Figure 8.14 : *Histogrammes des durées et des erreurs de distances pour la cible non-visible et une petite raideur, Sujet B.*

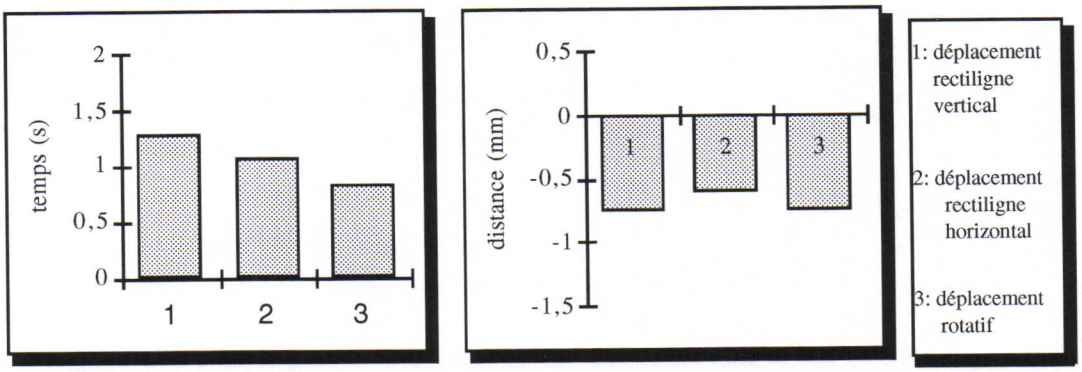


Figure 8.15 : *Histogrammes des durées et des erreurs de distances pour la cible non-visible et une petite raideur, Sujet C.*

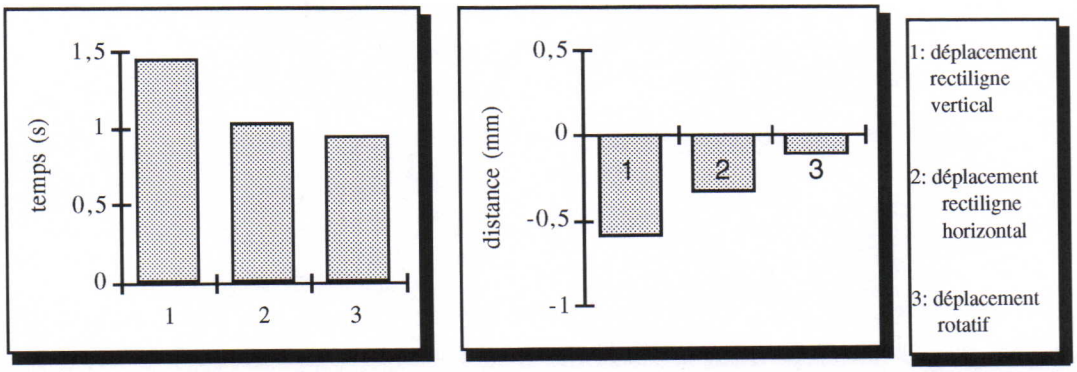


Figure 8.16 *: Histogrammes des durées et des erreurs de distances pour la cible non-visible et une raideur moyenne, Sujet A.*

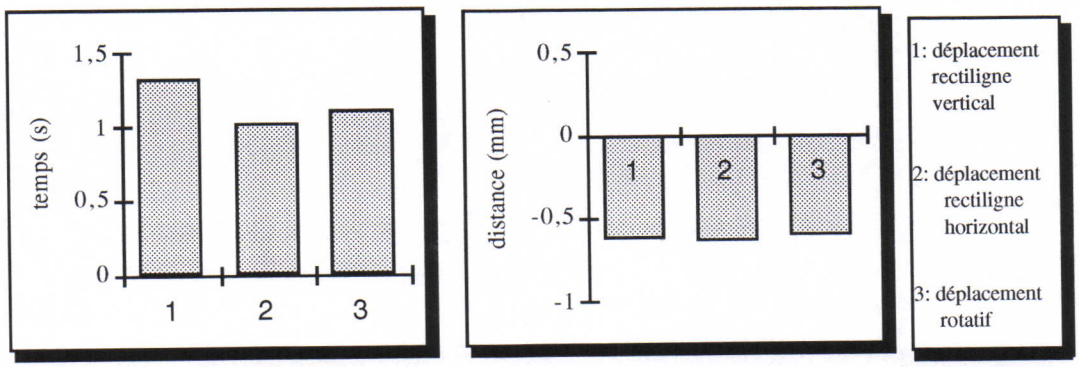


Figure 8.17 *: Histogrammes des durées et des erreurs de distances pour la cible non-visible et une raideur moyenne, Sujet B.*

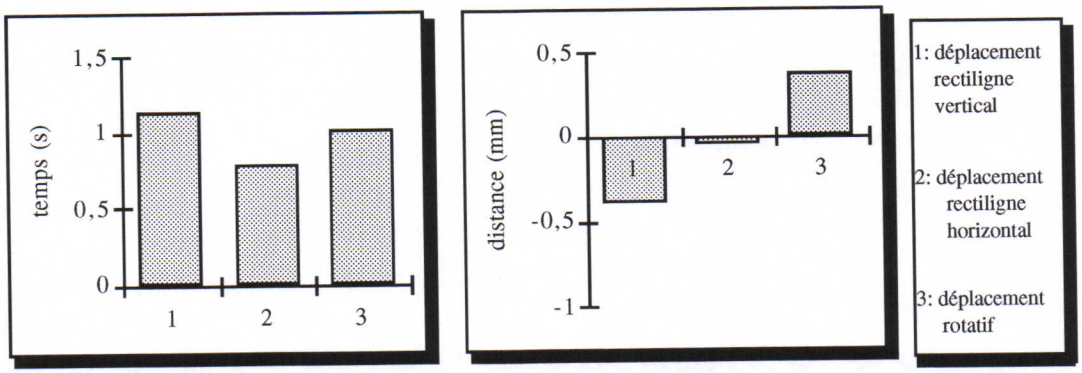


Figure 8.18 *: Histogrammes des durées et des erreurs de distances pour la cible non-visible et une raideur moyenne, Sujet C.*

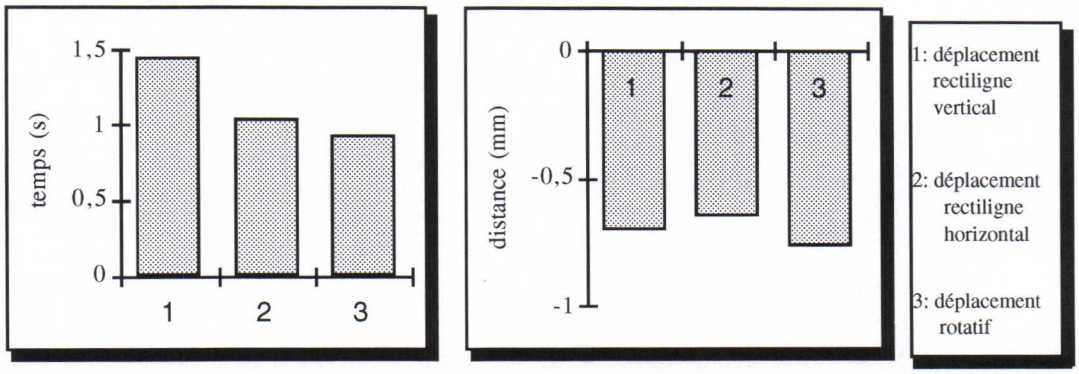


Figure 8.19 *: Histogrammes des durées et des erreurs de distances pour la cible visible avec retour d'effort , Sujet A*

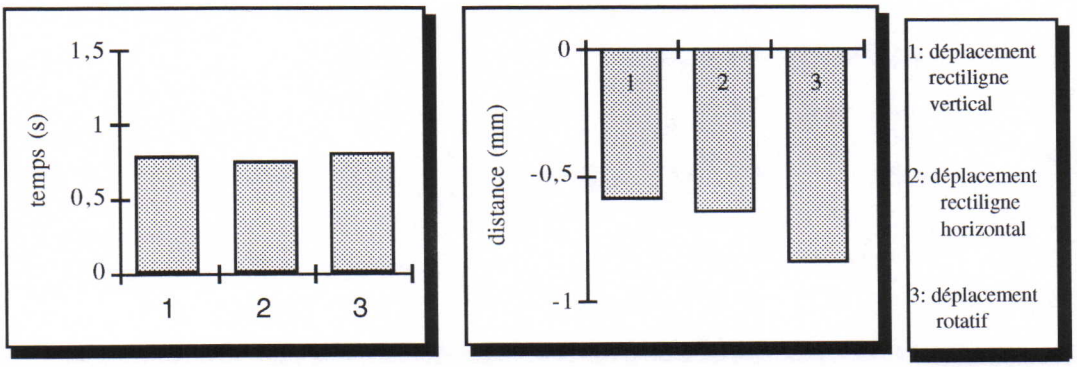


Figure 8.20 *: Histogrammes des durées et des erreurs de distances pour la cible visible avec retour d'effort , Sujet B*

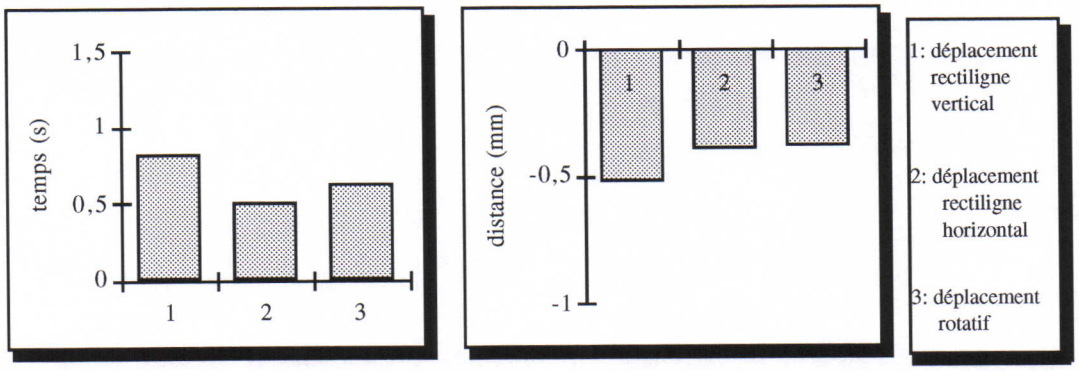


Figure 8.21 *: Histogrammes des durées et des erreurs de distances pour la cible visible avec retour d'effort , Sujet C.*

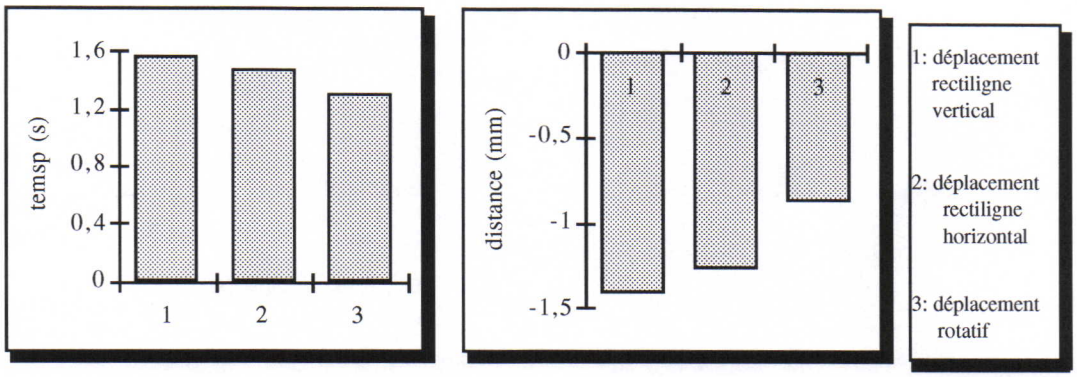


Figure 8.22 : *Histogrammes des durées et des erreurs de distances pour la cible visible sans retour d'effort , Sujet A*

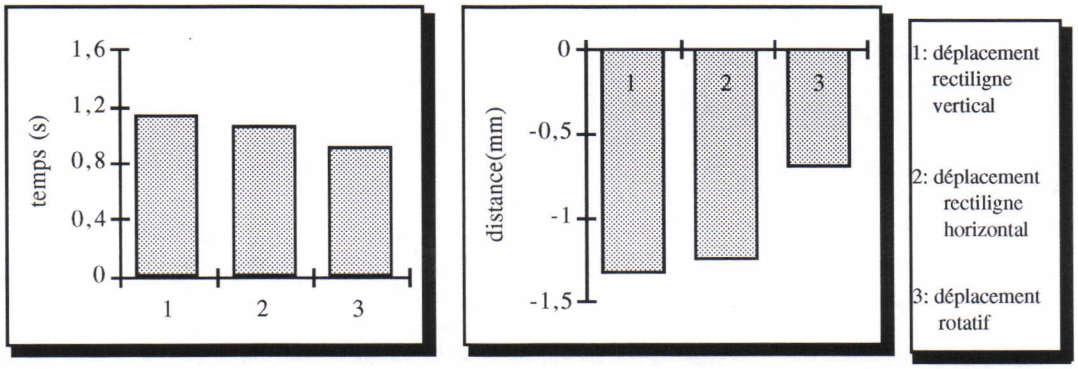


Figure 8.23 : *Histogrammes des durées et des erreurs de distances pour la cible visible sans retour d'effort , Sujet B*

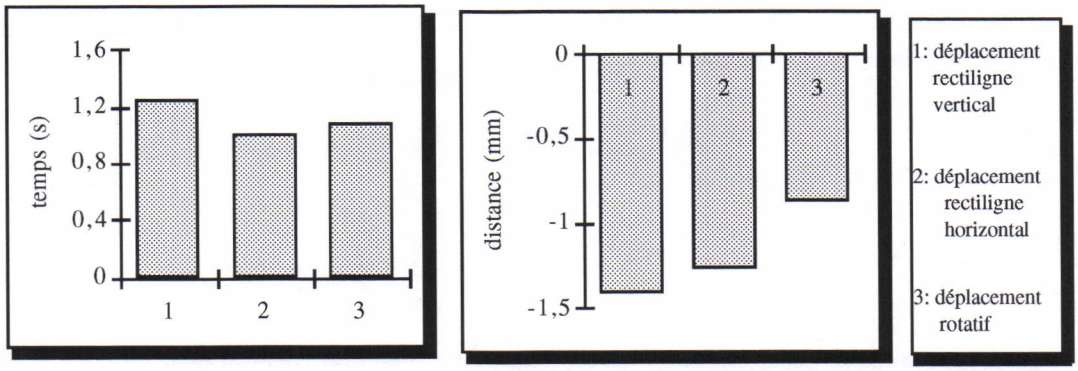


Figure 8.24: *Histogrammes des durées et des erreurs de distances pour la cible visible sans retour d'effort , Sujet C*

4.2. influence de la raideur de l'interaction

Pour étudier l'influence de la raideur de l'interaction nous avons présenté le résultat en 18 courbes, 6 courbes pour chaque sujet, 3 courbes pour les durées moyennes d'exécution et 3 courbes pour les erreurs de distance. Nous avons utilisé 3 valeurs de raideurs : 1 N/cm, 5N/cm et 10 N/cm. Nous avons présenté différentes courbes pour chacune des situations d'anamorphose.

Pour les différentes situations et conditions, l'erreur et le temps moyen d'exécution diminuent lorsque nous augmentons la raideur de l'interaction. Nous avons remarqué aussi qu'il peut exister une raideur optimale pour laquelle des interactions de non-pénétration permettent d'avoir une erreur nulle (le curseur s'arrête juste au niveau de la cible, il n'y a pas de chevauchement entre la cible et le curseur). Nous pensons par contre que la valeur de la raideur ne peut pas être augmentée au delà d'une certaine valeur car nous risquons inversement d'augmenter l'erreur. Ceci peut s'expliquer par des forces de répulsion importantes ne permettant pas au sujet de s'approcher de la cible. Nous pouvons envisager d'amortir beaucoup plus l'interaction en augmentant la viscosité de la liaison entre les deux objets.

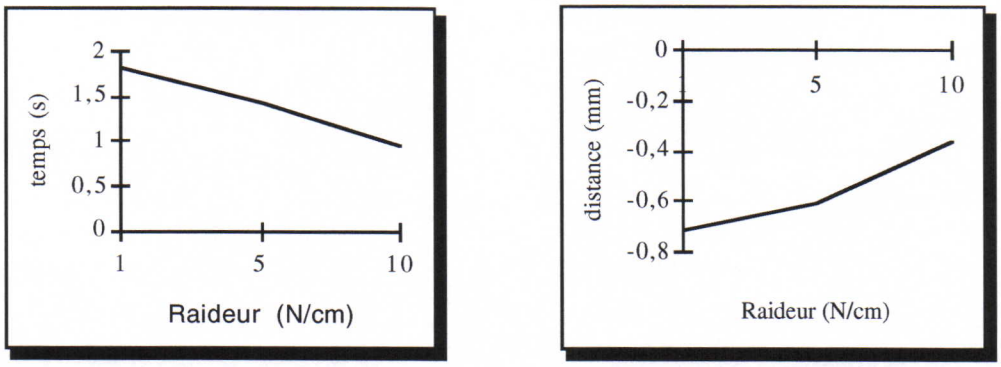


Figure 8.25 : *Variation de la durée de réalisation de la tâche en fonction de la raideur pour un déplacement vertical, Sujet A*

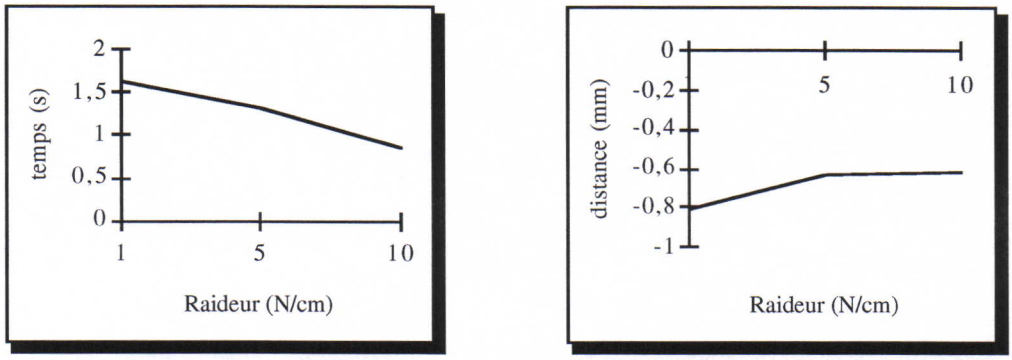


Figure 8.26 : *Variation de la durée de réalisation de la tâche en fonction de la raideur pour un déplacement vertical, Sujet B*

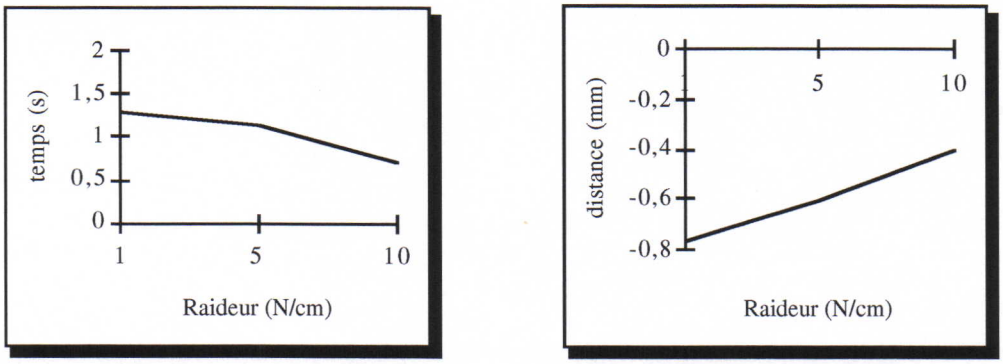


Figure 8.27 : *Variation de la durée de réalisation de la tâche en fonction de la raideur pour un déplacement vertical, Sujet C.*

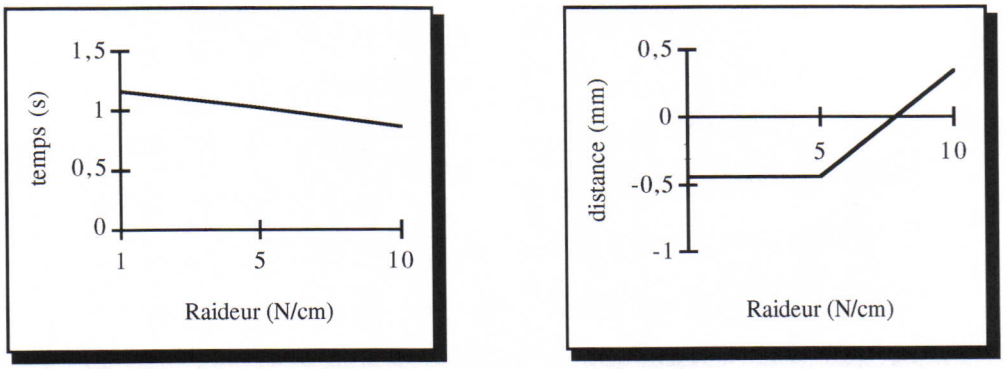


Figure 8.28 : *Variation de la durée de réalisation de la tâche et de l'erreur de position en fonction de la raideur, déplacement horizontal, Sujet A.*

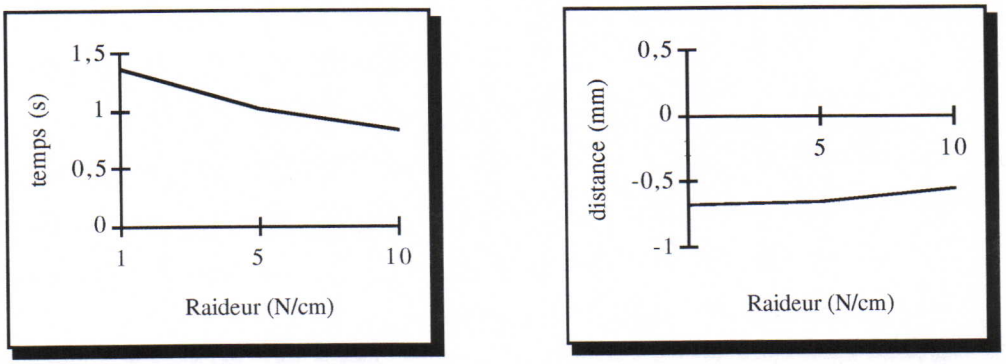


Figure 8.29: *Variation de la durée de réalisation de la tâche et de l'erreur de position en fonction de la raideur, déplacement horizontal, Sujet B.*

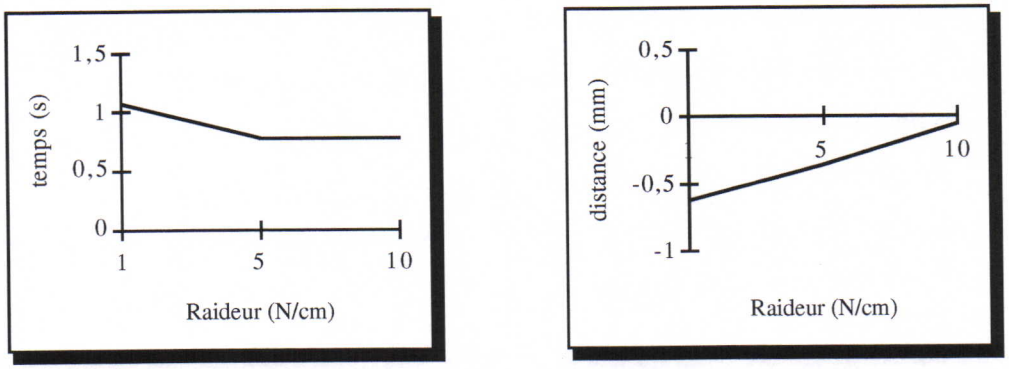


Figure 8.30 : *Variation de la durée de réalisation de la tâche et de l'erreur de position en fonction de la raideur, déplacement horizontal, Sujet C*

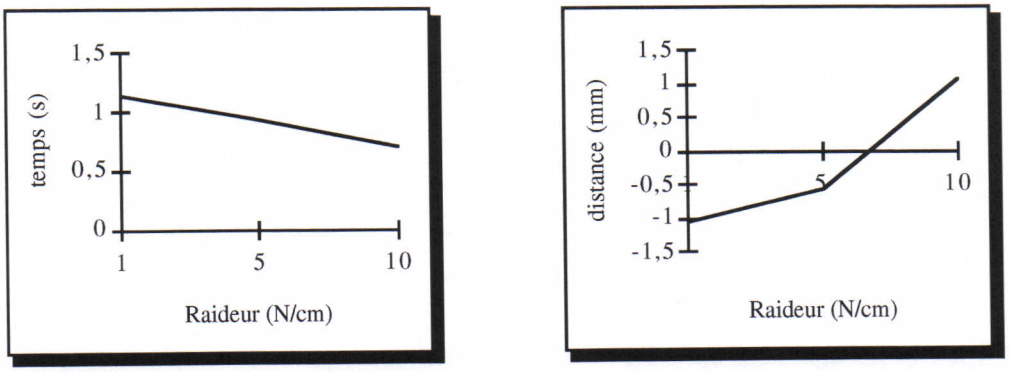


Figure 8.31: *Variation de la durée de réalisation de la tâche et de l'erreur de position en fonction de la raideur pour un déplacement rotatif, Sujet A*

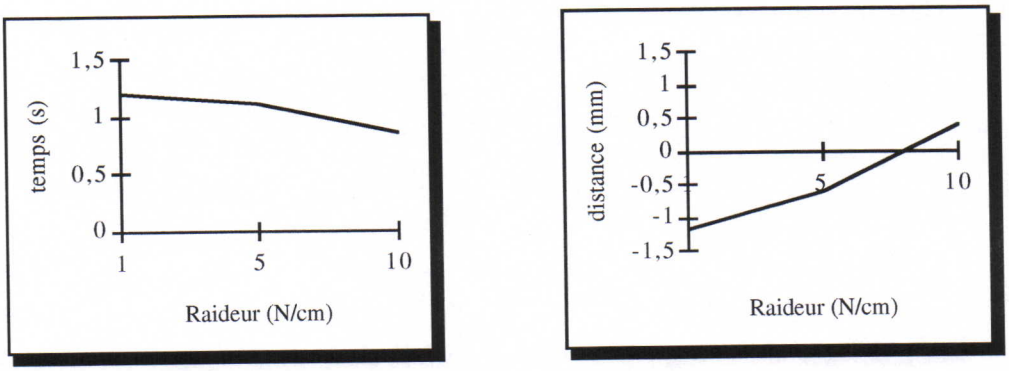


Figure 8.32 : *Variation de la durée de réalisation de la tâche et de l'erreur de position en fonction de la raideur pour un déplacement rotatif, Sujet B*

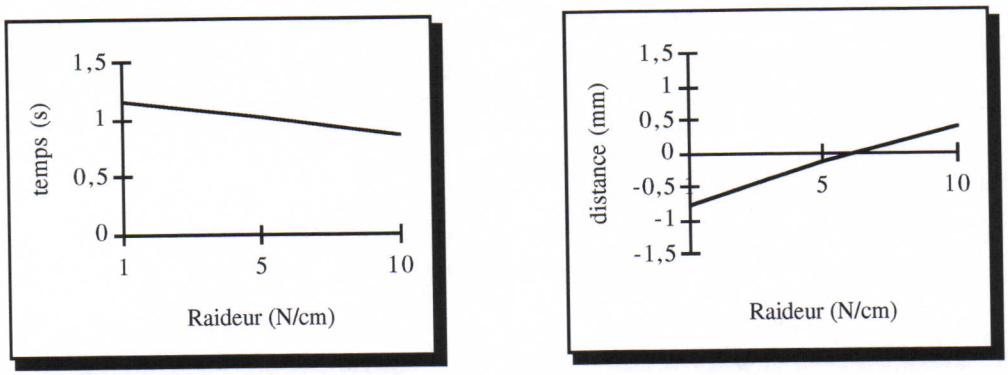


Figure 8.33 : *Variation de la durée de réalisation de la tâche et de l'erreur de position en fonction de la raideur pour un déplacement rotatif, Sujet C*

4.3. Variation de la représentation visuelle

Le résultat est représenté sous forme de 18 courbes, 6 courbes pour chaque sujet, dont 3 pour l'erreur moyenne de distance et 3 pour le temps moyen de réalisation de la tâche.

Chaque figure contient trois histogrammes :

- Le premier pour le cas où la cible est visible mais où il n'y a pas de retour d'effort (histogramme 1),
- Le deuxième pour le cas où la cible est non-visible mais où il y a un retour d'effort (histogramme 2),
- Et le dernier pour le cas où la cible est en même temps visible et perceptible gestuellement (histogramme 3),

De ces figures nous avons tiré les remarques suivantes :

• Pour la visualisation rectiligne verticale du déplacement du curseur *(figures 8.34, 8.35, 8.36)*, le temps moyen de réalisation de la tâche est meilleur lorsque nous avons en même temps du retour visuel et du retour kinesthésique (0,84 s). Par contre, la précision est la même que pour le cas du retour kinesthésique seul (0,61 mm).

Dans le cas où nous avons un retour visuel ou kinesthésique seul, le temps de réalisation à un peu près le même (1,3 s).

• Pour la visualisation rectiligne horizontale du déplacement du curseur *(figures 8.37, 8.38, 8.39)*, la performance la plus mauvaise est obtenue pour du retour visuel seul (temps moyen de déplacement (1,2 s) et l'erreur de distance moyenne est de 1,33 mm.

Le meilleur temps de réalisation de la tâche est obtenu pour des retour visuel et kinesthésique simultanés (0,68 s). Par contre, la meilleure précision est obtenue pour du retour kinesthésique seul (0,47 mm).

• Pour la visualisation du déplacement rotatif du curseur (Figure 8.40, 8.41, 8.42), on obtient un meilleur temps de réalisation de la tâche pour du retour visuel associé à du retour kinesthésique (0,7 s).

Par contre la meilleure précision est obtenue pour du retour kinesthésique seul (0,44 mm). La plus mauvaise est obtenue avec du retour visuel seul (1mm).

Le temps moyen de réalisation de la tâche est approximativement le même pour du retour visuel seul ou du retour kinesthésique seul (1 s).

Discussion

De ce que nous venons de dire nous pouvons tirer les remarques suivantes :

• La réalisation de la tâche est nettement plus rapide et plus précise lorsque nous avons en même temps de la perception tactilo-kinesthésique et de la perception visuelle dans le cas de la situation de référence (dite sans anamorphose).

• Pour les situations d'anamorphose, la différence entre l'action gestuelle et la perception visuelle a tendance à faire augmenter l'erreur de distance. De ce fait, la réalisation de la tâche est plus précise lorsque le sujet ne perçoit que du retour tactilo-kinesthésique. Ce qui explique aussi la tendance des sujets à ne plus regarder l'écran lorsque la visualisation ne correspond plus au déplacement réellement effectué.

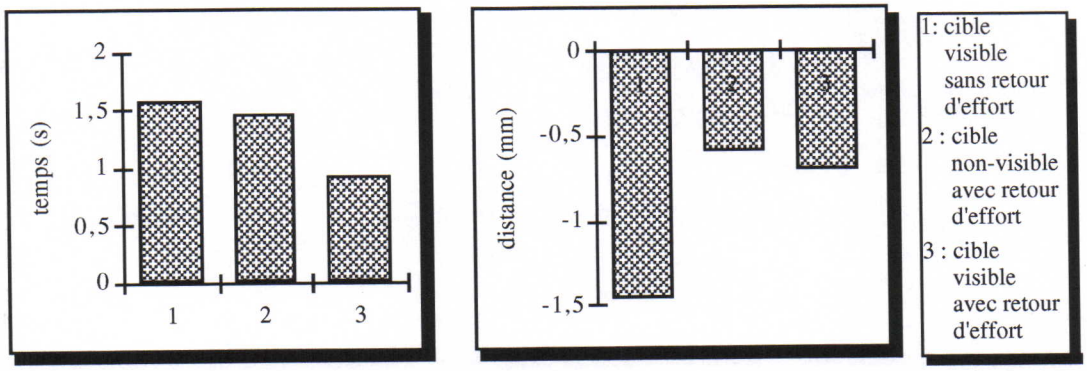


***Figure 8.34** : Durée et erreur de position en fonction de la perception, déplacement vertical, Sujet A.*

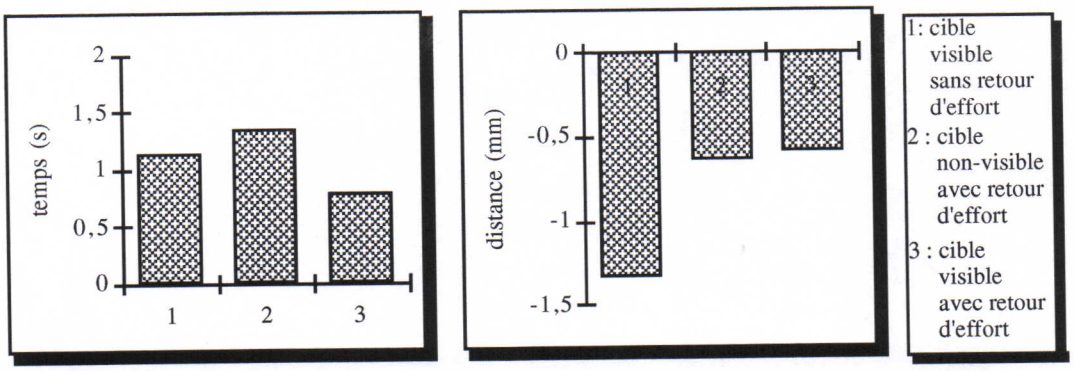


***Figure 8.35** : Durée et erreur de position en fonction de la perception, déplacement vertical, Sujet B.*

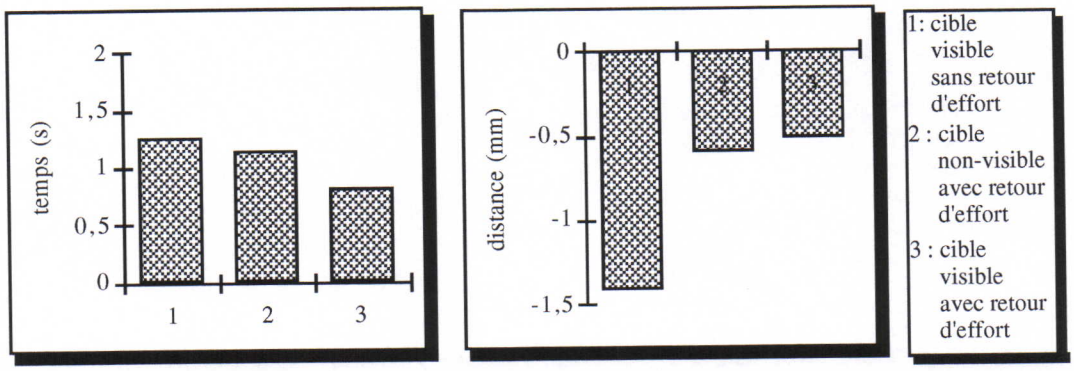


***Figure 8.36** : Durée et erreur de position en fonction de la perception, déplacement vertical, Sujet C.*

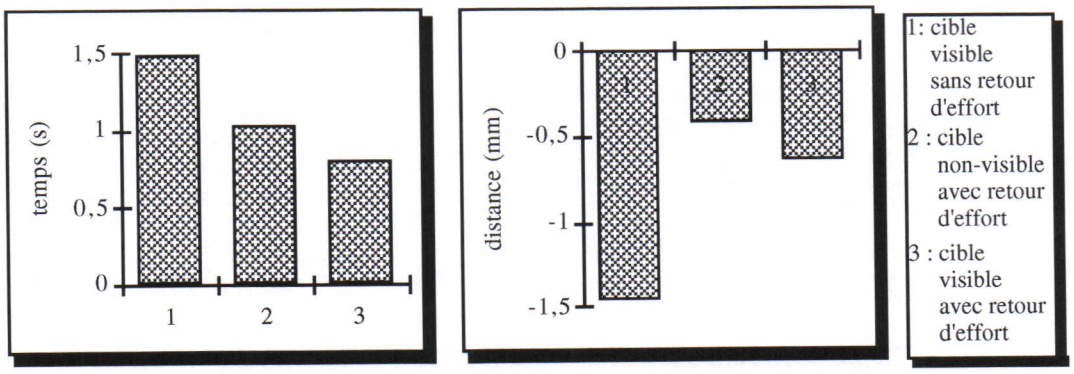


***Figure 8.37** : Durée et erreur de position en fonction de la perception, déplacement horizontal, Sujet A*

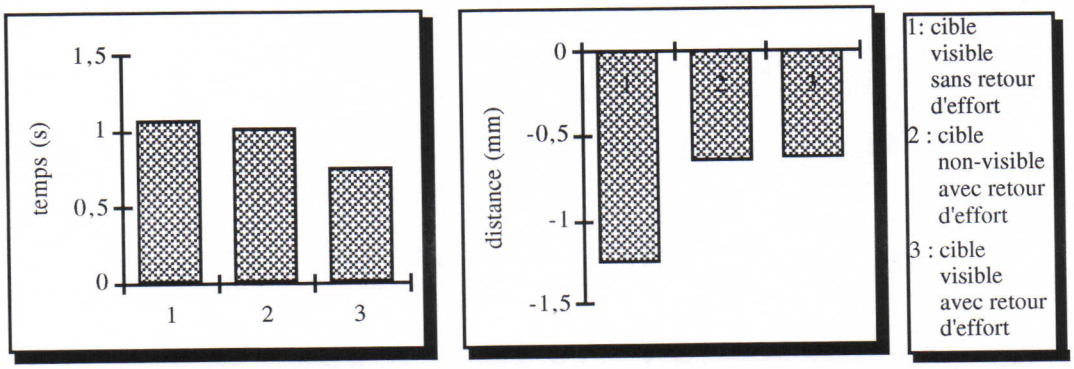


***Figure 8.38** : Durée et erreur de position en fonction de la perception, déplacement horizontal, Sujet B*

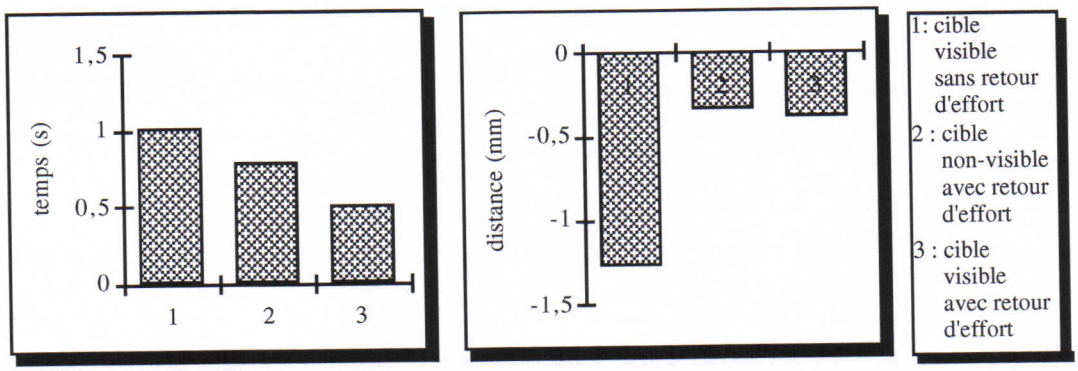


***Figure 8.39** : Durée et erreur de position en fonction de la perception, déplacement horizontal, Sujet C.*

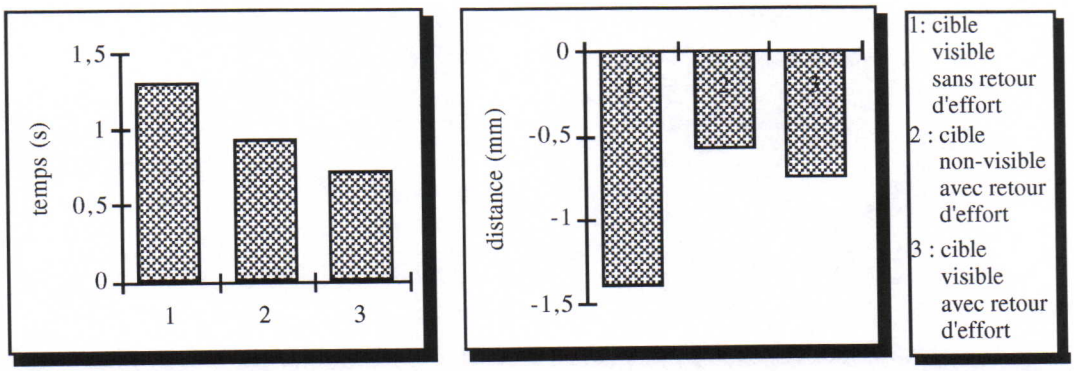


Figure 8.40 : *Durée et erreur de position en fonction du canal de perception, déplacement rotatif, Sujet A*

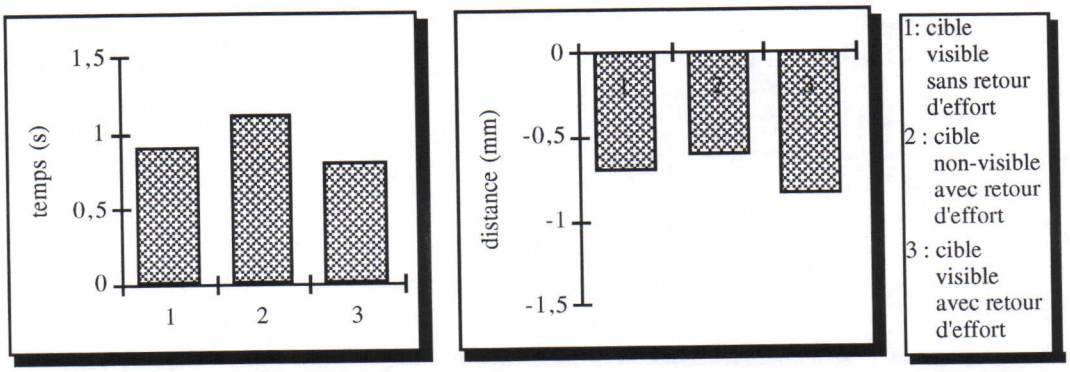


Figure 8.41 : *Durée et erreur de position en fonction du canal de perception, déplacement rotatif, Sujet B*

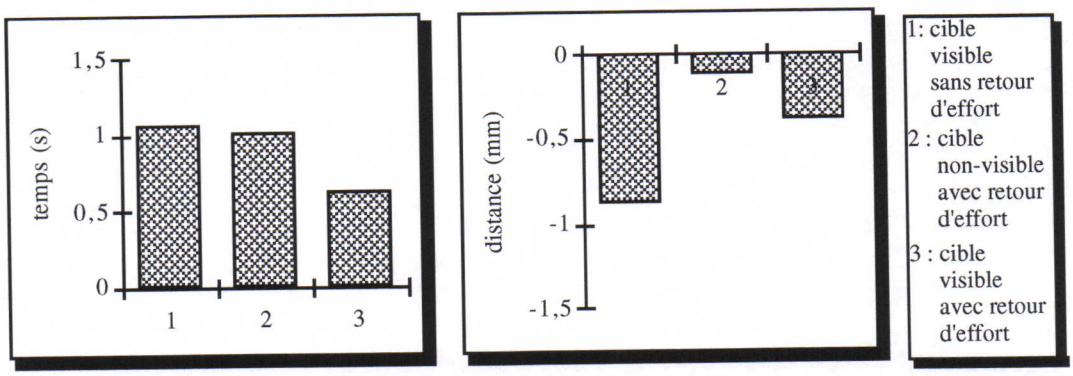


Figure 8.42: *Durée et erreur de position en fonction du canal de perception, déplacement rotatif, Sujet C*

4.4. interprétation des lois de Fitts et Meyer

Nous remarquons bien que pour les cibles visibles, les résultats vérifient les lois de Fitts [Fit54] :

$$TM = c_1 + c_2 . \log_2(\frac{2.D}{L})$$

où D est la distance entre le curseur et la cible,
L, largeur de la cible, c_1 et c_2 des constantes,

et Meyer [Mey90] :

$$TM = c_1 + c_2 . \sqrt{\frac{D}{L}}$$

Les différentes courbes *(figures 8.43 à 8.51)* représentent la variation du temps moyen d'exécution de la tâche en fonction de la distance du curseur par rapport à la cible.

De ces différentes courbes *(figures 8.43 à 8.51)*, nous avons déduit que :

- Les lois de Fitts et Meyer sont vérifiées pour tous les cas où la cible est visible[1].

- Par contre, ces lois restent vérifiées pour le déplacement rectiligne (vertical et horizontal), mais pas pour le déplacement rotatif lorsque la cible n'est plus visible.

[1]le calcul des constantes c1 et c2 peut se faire facilement par approximation des courbes.

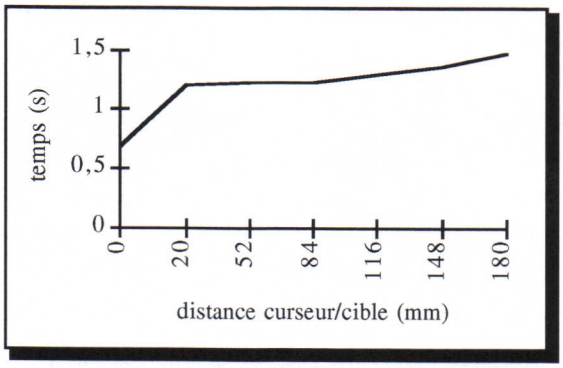


Figure 8.43 *:Temps moyen pour un déplacement rotatif du curseur en fonction de la position de la cible (visible sans retour d'effort) pour le sujet A,*

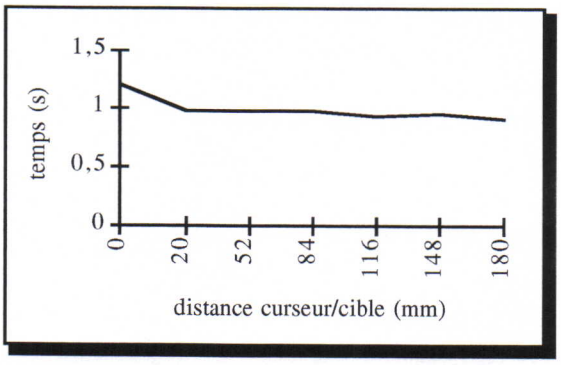


Figure 8.44 *:Temps moyen pour un déplacement rotatif du curseur en fonction de la position de la cible (non-visible avec retour d'effort) pour le sujet A,*

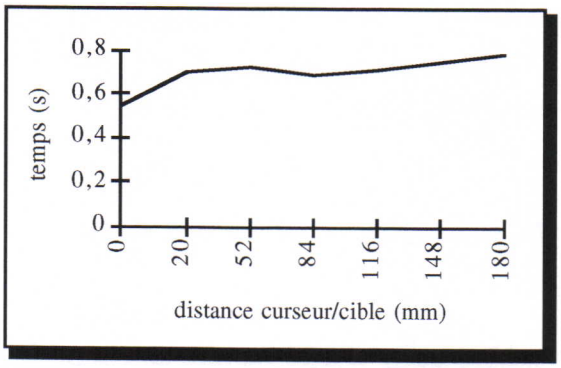


Figure 8.45 *: Temps moyen pour un déplacement rotatif du curseur en fonction de la position de la cible (visible avec retour d'effort) pour le sujet A,*

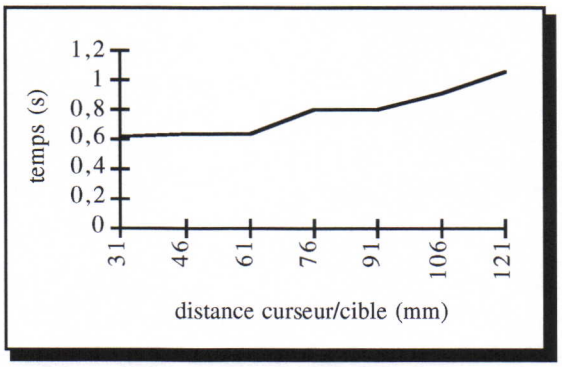


Figure 8.46 : *Temps moyen de déplacement horizontal du curseur en fonction de la position de la cible (non-visible avec retour d'effort) pour le sujet C,*

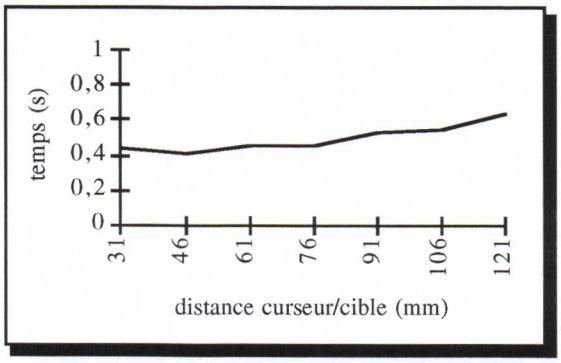


Figure 8.47 : *Temps moyen de déplacement horizontal du curseur en fonction de la position de la cible (visible avec retour d'effort) pour le sujet C,*

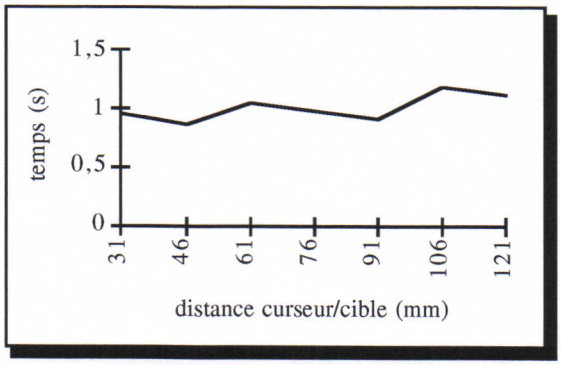


Figure 8.48 : *Temps moyen de déplacement horizontal du curseur en fonction de la position de la cible (visible sans retour d'effort) pour le sujet C.*

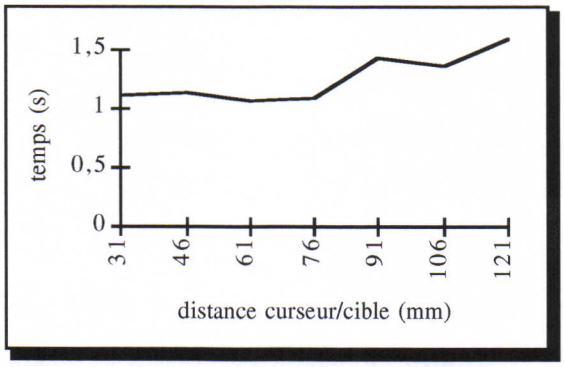


Figure 8.49 : *Temps moyen de déplacement vertical du curseur en fonction de la position de la cible (non-visible avec retour d'effort) pour le sujet B,*

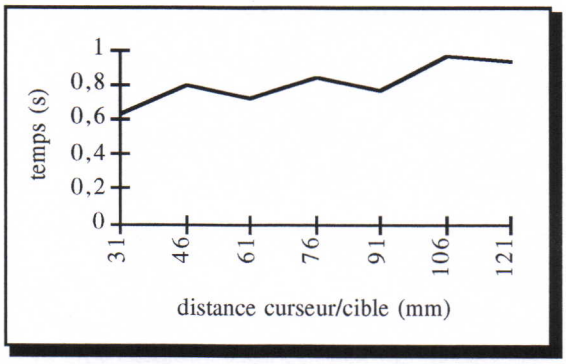


Figure 8.50 : *Temps moyen de déplacement vertical du curseur en fonction de la position de la cible (visible avec retour d'effort) pour le sujet B,*

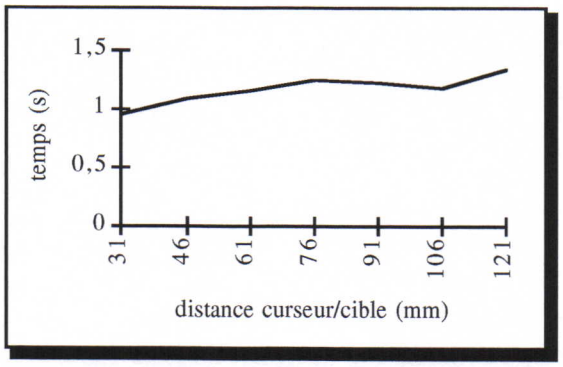


Figure 8.51: *Temps moyen de déplacement vertical du curseur en fonction de la position de la cible (visible sans retour d'effort) pour le sujet B.*

Discussion

Les lois de Fitts et Meyer ne sont pas vérifiées pour le déplacement rotatif. Ceci probablement pour deux raisons :

• La première raison est que la position initiale du curseur est confondue avec celle d'une cible.

• La deuxième raison est que la cible peut être atteinte de deux manières par le sujet : soit au début de la trajectoire, soit à la fin si elle a été ratée au départ. Ce qui explique l'augmentation de la durée de réalisation de la tâche pour la cible à la position 0 (confondue avec la position initiale du curseur) lorsqu'il n'y a pas de retour visuel.

Ces lois ne sont pas vérifiées, non pas à cause de l'anamorphose, mais plutôt à cause de la position de la cible sur la trajectoire fermée. Le sujet peut la percevoir au début de son déplacement ou à la fin dans le cas où il effectue un mouvement rapide au départ.

5. Stratégie et remarques des sujets

La stratégie utilisée par les sujets pour atteindre la cible non-visible varie avec la valeur de la raideur. Les sujets sont plus rapides lorsque la raideur est importante, du fait qu'ils sont sûrs d'être arrêtés par la cible dans leur course. Par contre, pour les faibles raideurs ils sont plus hésitants et ils effectuent souvent des aller-retours avant d'atteindre la cible.

La forme du curseur et de la cible ont provoqué parfois des erreurs de positionnement. Au moment d'activer l'interrupteur, le sujet glisse sur la cible et la position récupérée n'est pas celle désirée par le sujet[2]. Pour éviter ce genre d'erreur, on peut utiliser une sphère creuse pour la cible à la place d'une sphère pleine. La sphère pleine repousse simplement l'outil de pointage. La sphère creuse est une sphère qui peut se laisser traverser par une forte poussée et qui retient l'objet à l'intérieur. Pour en sortir, il faudrait exercer également une forte traction. Cet objet "chimère" est aisément simulable. Il se compose de deux sphères. La sphère externe serait en interaction de répulsion avec le curseur, et la sphère interne en interaction d'attraction. L'impénétrabilité d'une sphère est de plus réglable dans la fonction d'interaction entre lui et le curseur. Le curseur serait ainsi piégé dans la cible.

Les sujets ont tendance à ne plus s'intéresser à la visualisation lorsque le retour visuel est différent de l'action gestuelle (un des sujets a même fermé les yeux) pour la raideur faible. Les sujets ont été d'accord sur le fait que le retour kinesthésique diminue l'attention visuelle (qui pourrait être utilisée pour une autre tâche).

Les sujets ont tendance à prévoir l'effort à fournir lorsque la cible est visible. Dans le cas où la cible est non-visible et confondue avec le curseur, pour un déplacement rotatif, les sujets dépassent la cible dans la plupart des essais.

[2]Dans nos expériences lorsqu'une telle erreur est signalée, l'essai est annulé et on recommence.

Pour des raideurs importantes, les sujets signalent des vibrations parasites au moment de l'interaction avec la cible. Dans le cas où la cible est visible et confondue avec la position initiale du curseur, nous avons déduit le temps de réaction du sujet à environ 0,5 seconde (le temps qu'il met pour réagir et activer l'interrupteur de fin d'essai).

6. Conclusion

Dans cette expérience nous avons demandé aux sujets d'atteindre une cible avec la précision maximale avec un temps de réalisation le plus faible possible. Cette expérience a été réalisée pour trois types de déplacements de la cible : un déplacement rectiligne vertical, un déplacement rectiligne horizontal et un déplacement rotatif. La position de la cible changeait aléatoirement d'un essai à l'autre. Pour chacun de ces déplacements nous avons réalisé cinq conditions expérimentales différentes : vision de la cible sans retour d'effort, perception kinesthésique de la cible sans retour visuel (5 N/cm), perception de la cible visuellement et kinesthésiquement, perception de la cible kinesthésiquement avec une faible raideur (1 N/cm) et perception de la cible avec une grande raideur (10 N/cm). Dans toute l'expérience la position du curseur est visible.

Le déplacement réalisé par la main du sujet est de *3 cm* pour un déplacement de *21 cm* du curseur à l'écran.

Pour des faibles distances de déplacement l'anamorphose peut être accepté par le sujet, elle n'influe pas sur le temps de réalisation de la tâche. Donc on peut dire que pour des faibles déplacements, l'anamorphose n'influe pas de façon significative sur les performances du sujet.

La performance (temps et précision) augmente avec la raideur, mais nous pensons que pour de très grandes valeurs de raideur la force de répulsion deviendra importante et la précision diminuera. De cette mesure il faut comprendre que l'utilisateur est sensible à la raideur et qu'il existe une valeur optimale de raideur pour la meilleure précision de l'interaction. Mais ceci devrait être vérifié pour d'autres valeurs de raideurs et d'autres valeurs d'amortissement.

Les performances globales du sujet sont meilleures lorsque nous avons en même temps un retour d'effort et un retour visuel. Mais la précision est la même que celle obtenue avec retour d'effort, donc on peut dire que le retour d'effort améliore la précision et la vision améliore la vitesse. Dans certaines situations d'anamorphose (curseur rotatif dans ce cas), bien que le retour visuel augmente la vitesse de positionnement, les sujets ont tendance à fermer les yeux car ce retour visuel à tendance à diminuer la précision.

Pour les lois de Fitts et Meyer, elles sont vérifiées pour les situations expérimentales de positionnement rectiligne, mais pas pour la situation sans retour visuel pour le positionnement rotatif. Ceci est dû au fait que, dans une trajectoire fermée, les cibles qui sont trop près du curseur ne sont pas perçues au premier passage.

Chapitre 9

Habileté motrice

Dans ce chapitre, nous allons décrire une expérience portant sur l'habileté motrice, que nous avons montée à l'aide du simulateur et du système à retour d'effort. Nous travaillerons ensuite sur cette scène sur le rôle des anamorphoses visuelle et gestuelle, comme nous l'avons fait pour les expériences de pointage dans le chapitre précédent, et nous chercherons à cibler le rôle du retour d'effort sur les performances de l'utilisateur.

Dans une deuxième partie, nous présenterons quelques modèles de scènes qui nous ont servi dans notre travail, soit pour l'étude d'un type particulier d'interaction, soit pour mettre au point des outils qui pourront être utilisés plus tard pour d'autres types de tests.

1. Expérience sur l'habileté motrice

Dans le chapitre précédent, nous avons utilisé le simulateur de scènes physiques virtuels avec synthèse d'images et synthèse de perceptions gestuelles ainsi que le système à retour d'effort, pour approcher les effets de l'anamorphose visuelle et gestuelle sur l'exécution de cette tâche.

Toujours dans ce contexte de la simulation d'objets physiques, de la synthèse d'images et du geste avec retour d'effort, nous allons essayer d'aborder l'influence des ces anamorphoses sur des tâches où s'exerce une habilité motrice importante.

Dans la littérature, nous trouvons plusieurs types d'expériences sur l'habileté motrice [Fra74][Fam90] en fonction du paramètre à expérimenter. Dans le travail de Fraisse [Fra74], nous trouvons un protocole d'expérience sur l'habileté motrice dont le but est le déplacement d'un ensemble de rondelles d'un bout à l'autre d'un fil de fer ayant une forme particulière. Dans Famose [Fam90], on trouve une discussion sur l'habileté motrice dans l'activité sportive.

La scène générique choisie est la suivante : l'opérateur, muni d'une pince, doit aller chercher des objets déformables, les transporter sans les lâcher et les insérer dans un réceptacle. La pince pourra être de forme et de manipulation diverses. Le réceptacle pourra aussi être de forme diverse (encoche, trou, glissière...). Une parmi situation parmi celles-ci sera choisie pour les évaluations de performance. D'autres situations seront données à la fin du chapitre.

1.1. Conduite de l'expérience

Pour cette expérience, la population d'utilisateurs testée est représentée par 11 personnes travaillant au laboratoire, donc familières avec les outils de manipulation que nous présentons. Les résultats obtenus ici ne sont donc pas représentatifs pour d'une population quelconque.

La situation de référence "sans anamorphose" est celle dans laquelle :

- le sujet manipule une pince à deux mors, en contrôlant le déplacement du point d'articulation en X et en Y, à l'aide du stick 2D décrit au *Chapitre 6*.

- Il ouvre et ferme la pince à l'aide d'une troisième touche du système à retour d'effort *(figure 9.1)*.

- avec retours visuel et gestuel

Cela signifie que l'objet simulé "pince" qui réclame pour être manipulé 4 degrés de liberté, (soit 2 en translation - 1 en rotation - 1 pour l'ouverture et la fermeture, soit 2*2 degrés de liberté en translation comme une pince à deux mors), ne le sera en fait qu'avec 3 degrés de liberté. L'opérateur compensera la commande de la rotation par la dynamique de son geste.

Remarque : La situation de référence devrait en fait être celle où l'opérateur déplacerait la pince avec un système à 4 degrés de liberté, avec les retours visuel et gestuel. La situation de référence choisie est donc déjà plus complexe que celle-ci puisqu'elle impose une diminution du nombre de degrés de liberté de la manipulation par rapport à ce que celle-ci impliquerait dans sa structure.

Les objets manipulés sont au nombre de trois, un rectangle, un triangle et un carré, et sont déformables. La scène se compose également d'un objet physique appelé "enceinte" composée de cinq obstacles fixes entre lesquels sont percés deux trous.

Les objets manipulés sont en interaction de non pénétration viscoélastique avec la pince et avec l'enceinte *(cf. Annexe C)*. La pince est uniquement en interaction avec l'enceinte et les

objets à manipuler. Elle peut donc traverser les obstacles. L'opérateur ne perçoit tactilement l'enceinte que via les objets à insérer.

Mis à part la suppression des deux retours visuel et/ou gestuel, la variabilité de la situation porte sur la manière de déplacer les objets : soit avec un stick 2D, soit avec deux touches indépendantes, manipulées chacune par une main, se déplaçant toutes les deux verticalement, l'une contrôlant le déplacement en X et l'autre le déplacement en Y. Dans les deux cas, la fermeture et l'ouverture de la pince se fait avec une touche supplémentaire indépendante se déplaçant dans le sens vertical.

Les quatre situations testées sont les suivantes :

- Situation 1 : manipulation par 2 touches indépendantes sans retour d'effort,
- Situation 2 : manipulation avec le stick 2D sans retour d'effort
- Situation 3 : manipulation par 2 touches indépendantes avec retour d'effort,
- Situation 4 : manipulation avec le stick 2D avec retour d'effort.

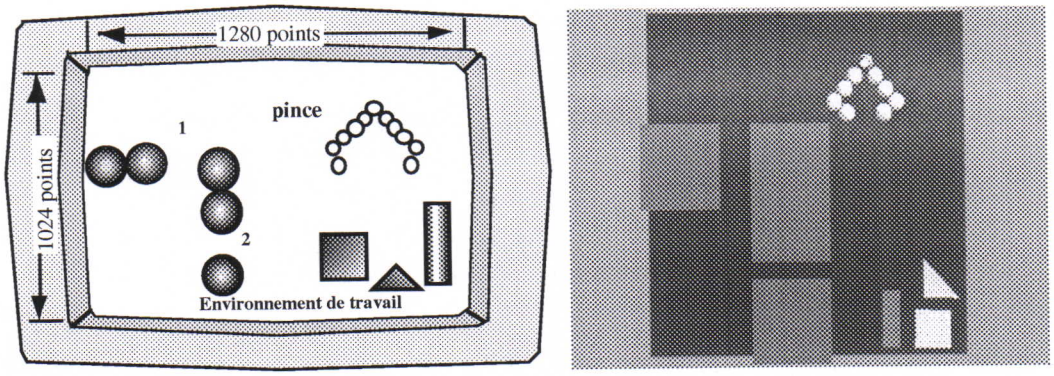


***Figure 9.1** : Saisie, déplacement et insertion d'objets déformables à l'aide d'une pince*

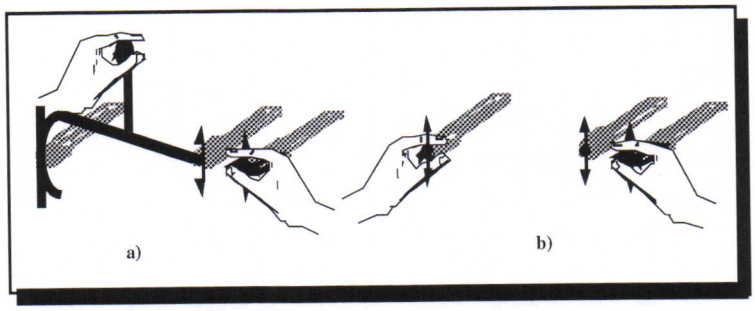


***Figure 9.2** : Les deux modes de manipulation : a) stick pour le déplacement et une touche pour ouverture/fermeture de la pince. b) deux touches pour le déplacement et une touche pour ouverture/fermeture de la pince*

L'instruction au sujet est qu'il saisisse les objets et les insères dans la première ouverture de l'enceinte, le plus rapidement possible. Lorsque tous les objets sont à l'intérieur de

l'enceinte, nous mesurons le temps réalisé par le sujet et nous recommençons l'expérience. Nous avons effectué 10 mesures pour chaque sujet et pour chaque situation.

1.2. Analyse des résultats:

La figure suivante donnent les résultats des performances de l'opérateur dans l'exécution de la tâche "saisie-déplacement-insertion" dans les quatre situations décrites précédemment.

Nous avons remarqué *(figure 9.3)*, que dans la première situation en présence de retour visuel uniquement, les sujets ont au premier abord, des difficultés à déplacer la pince avec les deux touches, car il leur faut synchroniser le déplacement de chaque touche pour atteindre l'objet à saisir. Avec retour d'effort (situation 2), bien que le déplacement soit encore maladroit, la saisie est améliorée par l'interaction avec l'objet et les parois de l'enceinte. Les sujets ont cependant manifesté une certaine fatigue au moment de l'utilisation du clavier sans le stick. En ajoutant le stick (situation 3) le sujet retrouve une manière de se déplacer qui lui est beaucoup plus familière et même sans retour de force il arrive facilement à réaliser la tâche. Dans la situation 4, le temps pour réaliser la tâche est nettement améliorée grâce au retour d'effort et à la correction de l'anamorphose.

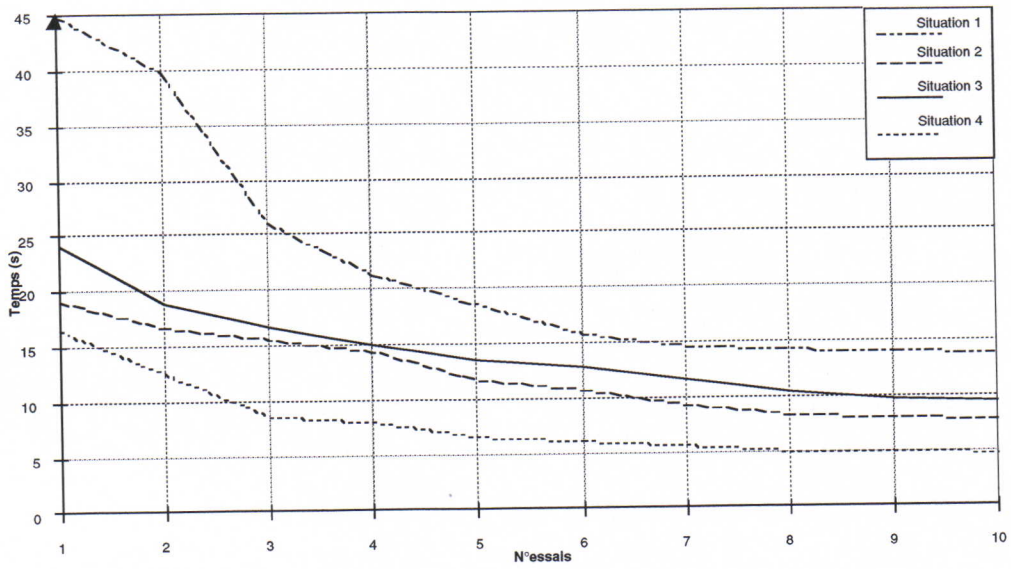


***Figure 9.3** : Résultats expérimentaux sur l'anamorphose*

1.3. Conclusion

Ces expériences ont montré que l'anamorphose imposée par la morphologie de l'instrument peut être corrigée par l'ajout du retour d'effort. Donc nous pouvons dire que l'ajout d'un autre retour sensoriel permet de diminuer la distance d'interprétation, et par la suite les effets de l'anamorphose morphologique manipulatoire.

L'importance de ce retour d'effort sera d'autant plus appréciable que la tâche se complique. Nous avons remarqué, dans une variante de cette expérience où la scène a été compliquée par ajout d'obstacles invisibles à l'intérieur de l'enceinte, que le retour d'effort est devenu

indispensable pour la réalisation de la tâche (la trajectoire des objets est gênée par ces obstacles invisibles, qui peuvent être fixes ou non).

2. Autres scènes pour la mesure de l'habileté motrice

Un autre modèle de scène a été réalisé pour l'expérimentation de l'habileté motrice dans laquelle il s'est agi de tester l'influence des contraintes de trajectoire sur l'habileté des doigts de la main et montrer les différences de comportement dans une activité répétitive en présence et en l'absence de retour d'effort.

Pour cette expérience, nous n'avons pas réalisé de protocole d'expérimentation mais nous avons uniquement observé et questionné les personnes qui ont eu l'occasion de manipuler (intérieurs et extérieurs au laboratoire).

La tâche du sujet était de déplacer des billes d'un bac à un autre, une par une, en utilisant la pince et allant aussi vite que possible. La pince est en interaction avec les billes et les bacs mais pas avec la trajectoire contrainte. Par contre, les billes sont en interactions avec les bacs et la trajectoire.

Quand le sujet a fait passer toutes les billes du bac 1 au bac 2, il doit les faire repasser immédiatement du bac 2 au bac 1.

Nous avons évalué approximativement le temps mis pour transporter chaque groupe de 10 billes dans un sens ou dans l'autre.

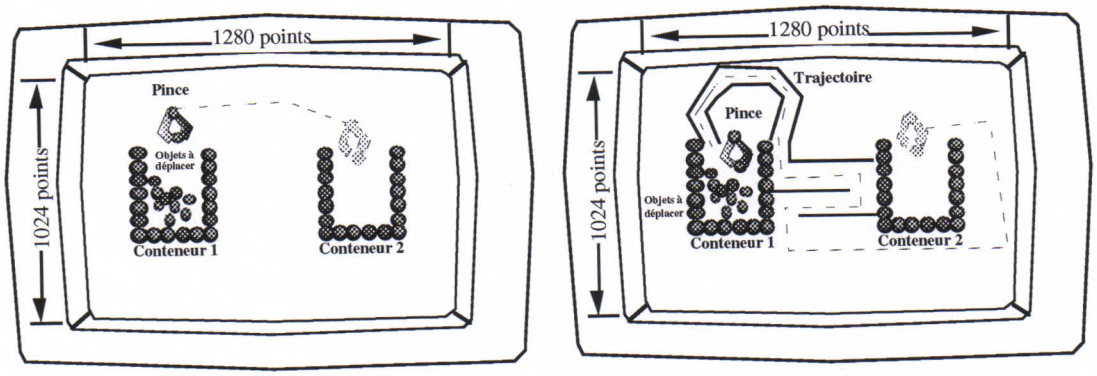


***Figure 9.4** : Modèle de la scène de transport de billes entre bacs*

Dans la première situation, la trajectoire du sujet n'est pas contrainte *(figures 9.4, 9.5)* et il n'y a pas de retour d'effort. Dans la deuxième situation, on ajoute le retour d'effort. Dans la troisième situation la trajectoire est cette fois-ci contrainte, mais il n'y a pas de retour d'effort. Ensuite nous remettons le retour d'effort. La trajectoire est contrainte par l'ajout d'un canal physique.

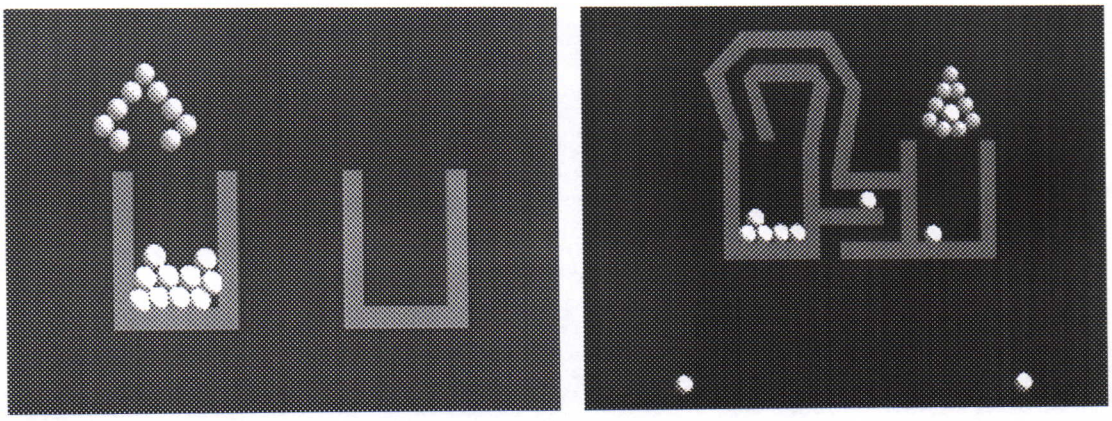


Figure 9.5: *la Scène de transport de billes entre bacs à l'écran*

Nous avons observé que le retour d'effort améliore les performances du sujet dans le cas de trajectoire contrainte. Par contre dans le cas où la trajectoire n'est pas contrainte, il n'y a pas de variation sensible entre la situation avec et sans retour d'effort. Pour la trajectoire contrainte, les erreurs sont beaucoup moins nombreuses avec retour d'effort. La perception de la trajectoire par l'utilisateur se fait à travers la bille (la bille est en interaction avec la trajectoire mais pas la pince) ce qui permet de la suivre avec précision. Ceci n'est pas possible sans retour d'effort. Le temps de réalisation de la tâche diminue avec l'apprentissage. Les sujets ont montré une baisse d'intérêt rapide pour les situations sans retour d'effort.

3. Autre modèle de scènes

A côté des modèles décrits plus haut, nous avons développé d'autres scènes qui nous ont permis de mettre en œuvre notre typologie des tâches sensori-motrices du chapitre 6.

3.1. Tâche d'assemblage

Le but de cette manipulation est de saisir un premier objet à l'aide d'une pince, et de l'assembler à un deuxième qui est fixe. La difficulté de la tâche consiste à placer les deux objets l'un par rapport à l'autre pour les assembler à l'aide d'une vis *(figure 9.6)*. Tous les modèles d'objets et d'interaction sont des modèles physiques CORDIS-ANIMA *(cf. Annexe C)*.

Dans cette manipulation, nous utilisons deux sticks à 2 DDL. Un premier stick est utilisé pour commander une première pince pour la saisie de l'objet mobile et un deuxième stick pour commander la pince qui saisira la vis d'assemblage.

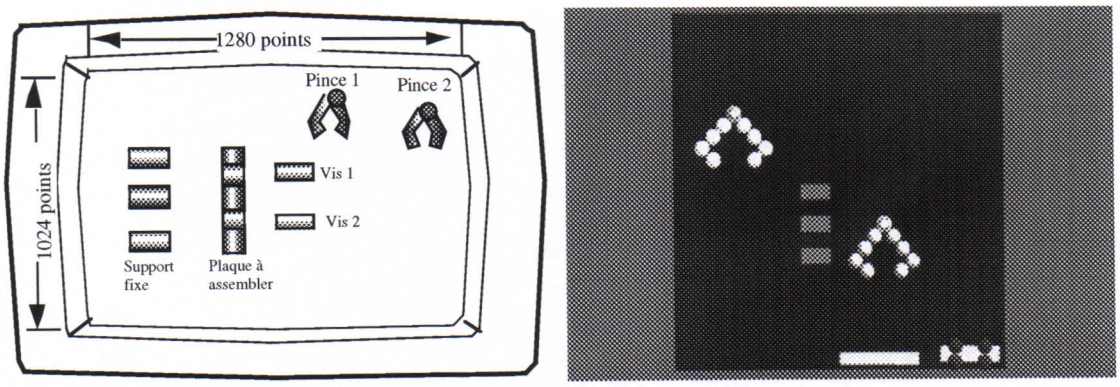


Figure 9.6: *Scène réalisée pour une tâche d'assemblage*

Nous avons réalisé une variation de cette scène *(figure 9.7)* où deux utilisateurs se partagent le même environnement virtuel d'objets physiques simulés mais pas le même environnement d'interaction : ils n'ont pas la même sortie visuelle et ils manipulent des touches indépendantes du même clavier).

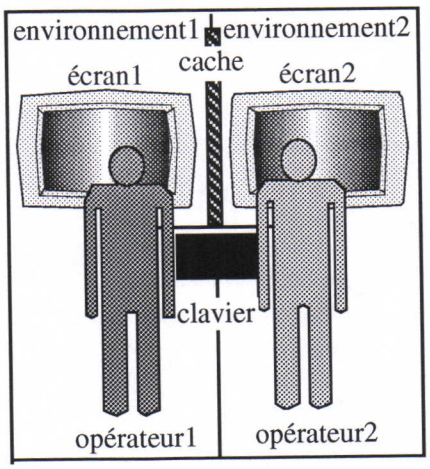


Figure 9.7: *Environnement d'interaction de l'expérience*

3.2. Tâche de télémanipulation

Dans cette tâche, le but a été la réalisation de toute la boucle de transmission entre un utilisateur et un environnement distant. Pour cette simulation, nous avons utilisé 4 touches du clavier dont deux jouent le rôle de dispositif-maître et deux autres jouent le rôle de dispositif-esclave.

Cette simulation reprend le principe qu'une tâche de téléopération est constituée de 4 systèmes distincts qui interagissent *(figure 9.8)* :

- L'opérateur humain.
- Le système maître (Touche 1)
- Le système esclave (Touche 2).
- L'environnement.

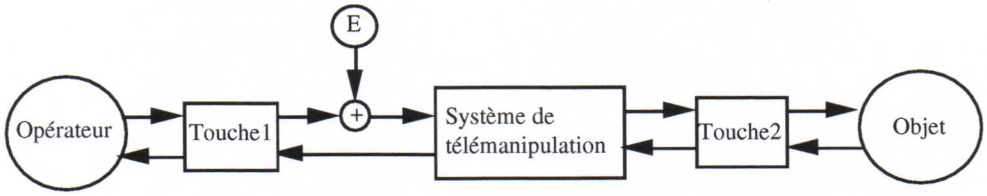


Figure 9.8 : *Couplage d'un système de télémanipulation*

Dans cette simulation, l'opérateur va manipuler deux touches. Dans l'environnement de la tâche il y a deux autres touches qui sont une copie exacte de celles manipulées par l'opérateur. Un déplacement ou une force appliqué dans un des deux environnements est exactement retransmis à l'autre. Nous avons aussi la possibilité d'augmenter ou de diminuer une force d'une coté ou de l'autre des espaces par l'usage de modules MPVR, appliquant de coefficients d'échelle sur les forces.

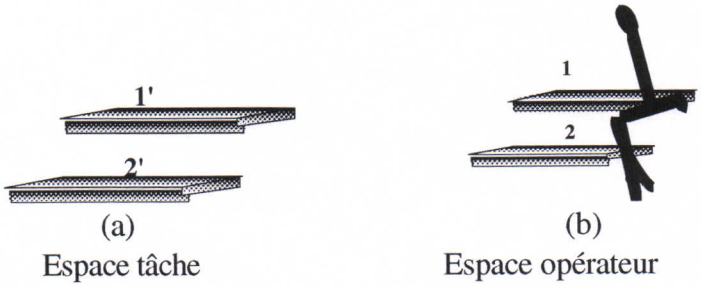


Figure 9.9 : *Montage réalisé pour expérimenter la dextérité de l'opérateur pour des tâches de téléopération*

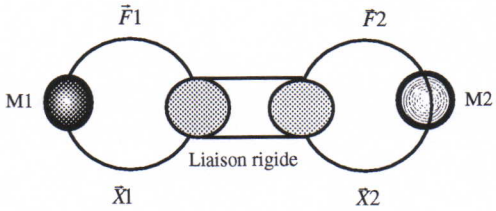


Figure 9.10 : *Modèle de la liaison Cordis-Anima utilisée entre deux touches*

3.3. Véhicule articulé

Dans cette simulation, nous avons réalisé un véhicule à pattes. L'objectif était la réalisation de la motorisation et les possibilités de commande qu'il permet. Cette simulation nous a permis d'observer qu'un véhicule motorisé ne demande pas un effort sensori-moteur important car les gestes de l'opérateur humain ne sont pas complexes, dans le sens où il n'agit sur le véhicule que pour le faire tourner, avancer, etc. La tâche de l'utilisateur ne devient importante qu'au moment où le véhicule est bloqué, et l'opérateur doit fournir un effort mental pour le dégager.

Pour cette manipulation, il nous a fallu tout d'abord réaliser un véhicule articulé à pattes et les modules de commande qui vont avec. Chaque patte est commandée par deux pistons. Le mouvement synchronisé des pistons et le déphasage entre les pattes permettent au véhicule de se déplacer.

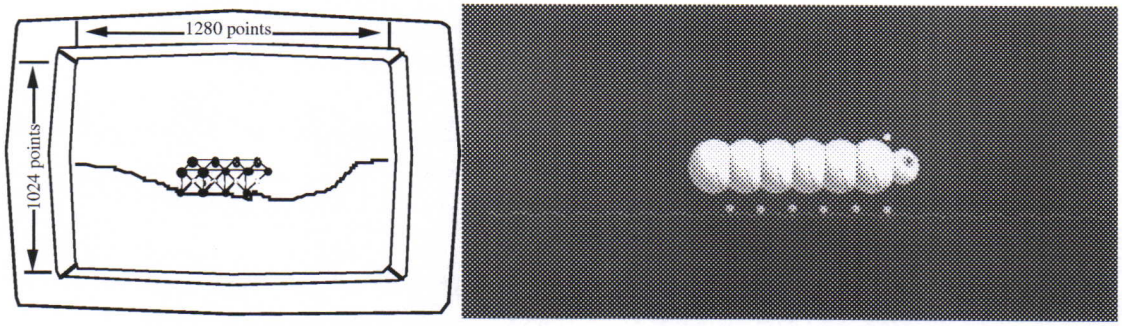


***Figure 9.11** : Véhicule à pattes.*

3.4. Perception des objets géométriques

Dans cette simulation, nous avons essayer une autre configuration du clavier dans laquelle nous projetons une partie de l'objet sur les différentes touches. Le clavier joue le rôle cette fois-ci de matérialiseur de formes déformables simulées. Une ligne déformable est simulée par CORDIS-ANIMA. Elle est discrétisée en 16 points. Chacun de ces 16 points est connecté à une touche du clavier. Le clavier, vu comme une ligne discrétisée en 16 points, va suivre le comportement de la ligne simulée. Un objet posé sur la ligne virtuelle va déformer celle-ci et la forme va être perceptible sur le clavier lui même, à la fois visuellement (variation cohérente de la position des touches) et tactilement (si l'utilisateur pose les mains sur le clavier). Par action sur le clavier, l'opérateur peut également déformer la ligne virtuelle et donc faire bouger la boule virtuelle. Il sent alors la boule rouler sur ses mains.

Cette deuxième forme d'interaction est différente de toutes celles décrites précédemment. On ne projette pas l'instrument manipulé par l'utilisateur dans l'environnement virtuel mais on projette les objets de l'environnement virtuel dans l'environnement physique de l'utilisateur. Cette nouvelle manière d'interagir permet à l'utilisateur de mieux percevoir la forme de l'objet, même sans le retour visuel à l'écran.

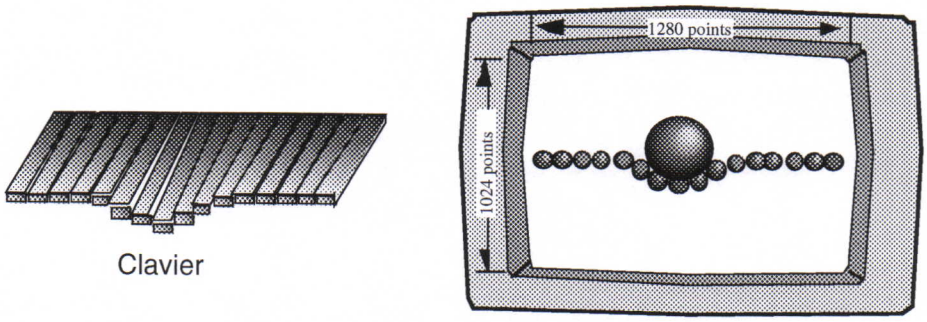


***Figure 9.11:** Manipulation du tapis d'aiguilles*

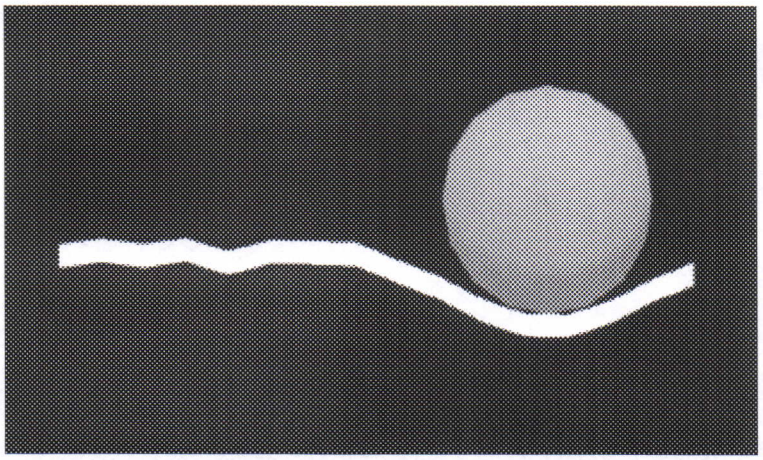


Figure 9.12: *Scène de manipulation du tapis d'aiguilles*

4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une expérience sur l'habileté motrice et nous avons vu que le retour d'effort peut aider à interpréter des situations d'anamorphoses d'interaction, ce qui veut dire que l'anamorphose sur un canal peut être compensée par une information donné par un autre canal sensoriel.

Dans une seconde partie, nous avons présenté quelques outils développés pour la réalisation de la taxonomie des tâches, et déterminé quels sont les paramètres à considérer. Certains de ces outils seront utilisés dans l'application décrite dans le chapitre suivant.

Chapitre 10

Application

Dans ce chapitre, nous allons présenter une application basée sur les principes introduits dans les chapitres qui précèdent et les résultats auxquels nous sommes parvenus. Il s'agit d'une simulation d'une tâche de chirurgie de l'oeil. Le but immédiat visé ici n'est pas la réalisation d'un simulateur mais est davantage de montrer sur un exemple concret la modélisation d'une tâche sensori-motrice.

Le cadre applicatif dans lequel ces travaux peuvent s'insérer est celui de l'apprentissage et l'entraînement au geste chirurgical de l'oeil à l'aide de simulateurs chirurgicaux [Mes97][Hun93]. Le principal objectif serait à terme de permettre au chirurgien-débutant d'arriver à appréhender, sur simulateur, avant de passer à des situations réelles, les sensations liées à la manipulation des outils de chirurgie et de maîtriser les problèmes de coordination oeil-main. Un tel apprentissage ne peut se faire uniquement avec de la perception visuelle. Nous avons vu dans le *Chapitre 8* que les performances de l'utilisateur s'améliorent avec l'ajout de la perception proprio-tactilo-kinesthésique.

Nous n'avons pas effectué ici d'évaluations sur les différentes situations d'anamorphoses possibles par rapport à une situation de référence (qu'il faudrait au préalable choisir) . Il faudrait pour cela disposer d'un calibrage quantitatifs des modèles (modèle de l'oeil et modèle des outils réels) sous peine d'invalidité importante des résultats. Les chapitres précédents montrent la démarche qui pourrait alors être suivie.

Nous allons implémenter ici différentes situations d'apprentissage avec les dispositifs et les méthodes que nous avons développés précédemment. L'apprentissage peut se faire de trois manières :

- L'apprenti chirurgien apprend à manier l'outil en agissant sur un oeil virtuel,
- L'apprenti est assisté par un chirurgien qui manipule en même temps que lui le scalpel virtuel (tâche impossible à réaliser dans la réalité) et la tâche de l'apprenti sera de suivre le geste du chirurgien expert.
- Une troisième manière est de s'entraîner à partir du geste enregistré et sauvegardé du chirurgien expert.

Cette application n'a pas l'ambition d'avoir le réalisme d'une opération chirurgicale réelle. Il faudrait pour cela disposer de connaissances plus quantitatives sur les objets en cause ainsi que sur les exigences des chirurgiens que nous n'avons pas pu acquérir durant notre thèse. Ceci peut être envisageable en collaboration avec les spécialistes du domaine des simulateurs chirurgicaux.

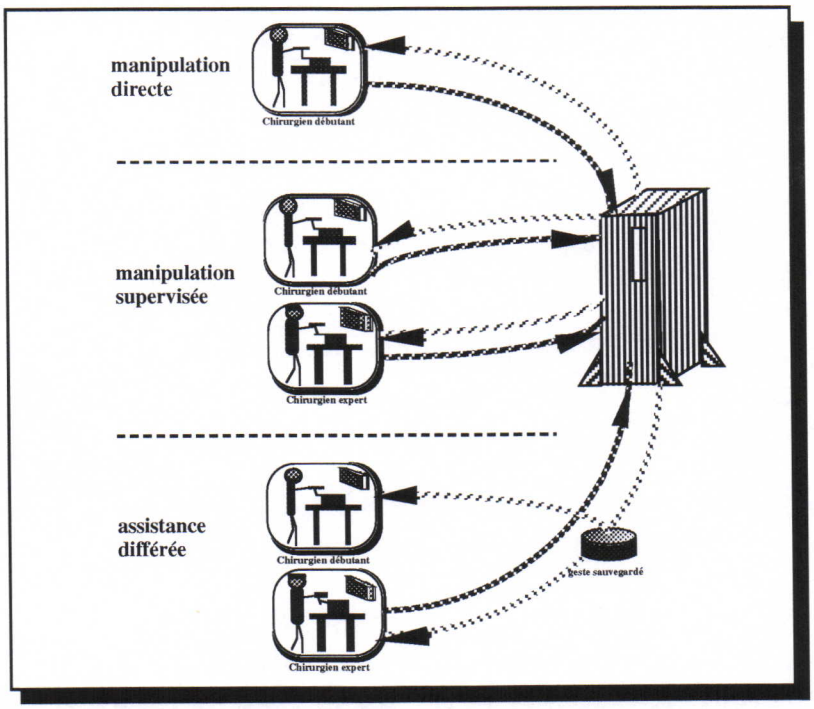


Figure 10.1 : *Différents modes d'interactions avec le système*

1. Fonctionnalités du système

1.1. Mode d'entraînement direct

Dans ce mode, l'utilisateur manipule librement le scalpel, il agit sur l'oeil et perçoit un retour proprio-tactilo-kinesthésique lorsqu'il agit dessus.

1.2. Mode d'entraînement supervisé

Dans ce mode, il y a intervention de deux acteurs, l'utilisateur débutant assisté de l'utilisateur expérimenté (expert). Au cours de la manipulation les gestes de l'utilisateur débutant sont corrigés par l'utilisateur expert, ou bien l'utilisateur débutant suit les mouvements de l'utilisateur expert. Ici, nous avons deux instruments physiques qui agissent sur le même objet virtuel.

1.3. Mode d'entraînement avec assistance différée

Dans ce mode l'utilisateur débutant utilise un geste de l'utilisateur expert enregistré au préalable. Dans ce cas, il ne peut que suivre les gestes de l'expert, ces propres gestes sont guidés : c'est l'instrument virtuel qui guide le mouvement du geste réel.

2. Caractéristiques des dispositifs d'entrées et de sorties

Nous avons utilisé comme dispositif d'entrée le clavier rétroactif modulaire (*Chapitre 6)* et comme dispositif de sortie un écran graphique dont les caractéristiques sont exposées dans les sous-sections qui suivent.

2.1. Caractéristique du dispositif d'entrée à retour d'effort

Paramètre physique capté par le dispositif	Position
Nature du déplacement	Translation
Intervalle d'entrée des grandeurs captées	[-1,5 cm->1,5 cm]
Intervalle de sortie des grandeurs captées vers l'application	[-32768->32768]
Référentiel	Absolu
Précision	0,7 µm
Intervalle d'entrée de l'application vers le dispositif	[-32768->32768]
Intervalle de sortie du dispositif vers l'utilisateur	[-20 N, 20 N]
Grandeur physique de sortie	Force
Précision en sortie	$1 . 10^{-2}$ N
Degrés de liberté	16
Bande passante	1 Khz

2.2. Caractéristiques de l'écran graphique

Intervalle d'entrée de l'application vers le dispositif de sortie	1024 pixels x 1280 pixels
Intervalle de sortie du dispositif vers l'utilisateur	274 mm x 343 mm
Type de sortie	Graphique
Précision	0,26 mm
Bande Passante	72 Hz
Degrés de liberté	2

3. Modèle physique de l'oeil

Les organes du corps humain sont en général très déformables, et les lois régissant leur comportement très complexes, parfois mêmes inconnues. De nombreuses solutions ont été proposées afin de modéliser des objets déformables, soit dans le domaine de l'animation graphique par ordinateur[Jim93][Hab97], soit dans le domaine de la physiologie [Cor70][Rig85].

Un modèle de l'œil ainsi qu'une analyse des besoins en terme de simulateurs chirurgicaux a été le sujet central de la thèse de Philippe Meseure et du travail mené au laboratoire LIFL sous la responsabilité de C. Chaillou dans le projet "simulateurs chirurgicaux" [Mes97]. Nous avons ici opté pour un modèle assez simple pour des raisons de rapidité de calcul car le propos étant de permettre un geste instrumental à retour d'effort, la simulation ainsi que les entrées-sorties doivent s'effectuer à une fréquence d'échantillonnage de 1050 Hz *(cf. Chapitre 6).*

3.1. Caractérisation des objets intervenant dans la tâche

Nous allons commencer par caractériser l'oeil suivant la taxonomie des tâches que nous avons définies au *Chapitre 4.* L'oeil *(figure 10.2)* peut être considéré comme un objet non-homogène ; pour simplifier notre modèle nous considérons qu'il est constitué de cinq sous-objets : Le cristallin, l'humeur vitrée, la sclérotique, l'iris et les muscles ciliaires.

L'oeil

• Le cristallin peut être considéré comme un objet homogène caractérisé par une raideur R_C et une viscosité V_C. Il est de forme sphéroïde aplatie de diamètre D_C (dans notre modèle nous l'avons considéré sphérique), ayant une masse M_C légèrement mobile.

• Les muscles ciliaires fixent le cristallin à l'iris. Ils possèdent une raideur R_M et une viscosité V_M.

• L'iris est assez complexe à modéliser, dans notre application il n'intervient pas dans l'interaction avec l'utilisateur. Il sert uniquement comme point d'attache des muscles ciliaires. C'est pour cette raison qu'on ne s'intéresse pas à ses propriétés physiques.

• L'humeur vitrée peut être considérée comme un milieu homogène caractérisé par une raideur R_{HV}, une viscosité V_{HV}, une masse M_{HV} et un diamètre D_{HV}.

• La sclérotique renferme l'humeur vitrée et elle est caractérisée par une raideur R_S et une viscosité V_S et un diamètre D_S (la masse de sclérotique n'est pas considérée car on la modélise par un point matériel fixe).

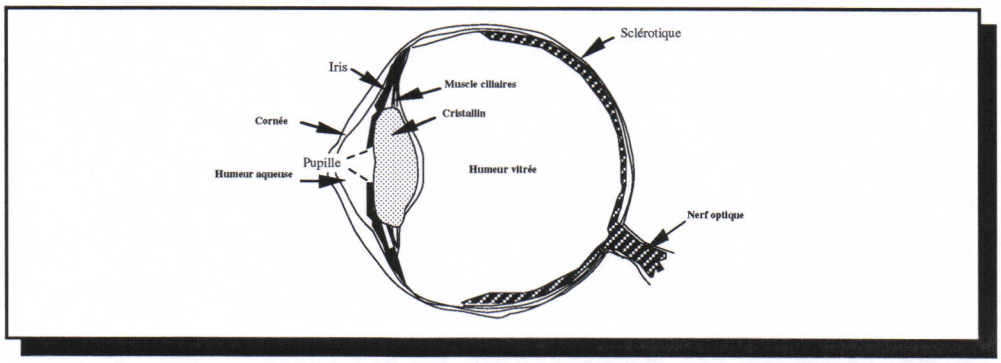


Figure 10.2 : *Coupe anatomique de l'oeil.*

L'environnement, l'instrument et l'utilisateur

• Le scalpel est caractérisé par une rigidité R_I, une viscosité V_I, une masse M_I. Il est caractérisé par une forme cylindrique de longueur L_I et de diamètre D_I.

• L'environnement est un milieu 3D non-contraint et homogène caractérisé par une viscosité Z_M et une gravité G_M.

• L'effort fournit par l'opérateur dans une telle tâche ne dépasse pas *1 N* [But95].

Actuellement, la tâche est considérée comme une tâche de positionnement du scalpel par rapport à l'œil, donc elle n'a pas de contraintes particulières, la précision mise à part .

3.2. Modèle physique de l'oeil et du scalpel

- Le cristallin est modélisé par un point matériel lié à l'iris par des liaisons viscoélastiques.

- L'iris est représenté par six points matériels fixes. L'iris n'est pas en interaction physique avec le scalpel. *(figures 10.3, 10.4).*

- L'intérieur de l'oeil (humeur vitrée) est modélisé par un ensemble de 25 masses ponctuelles d'assez faible inertie *(figures 10.3, 10.4).* Ces points matériels interagissent entre eux par l'intermédiaire d'une interaction viscoélastique non-linéaire définie dans la section qui suit.

Cette fonction d'interaction possède une viscosité importante pour donner l'effet d'un milieu assez mou.

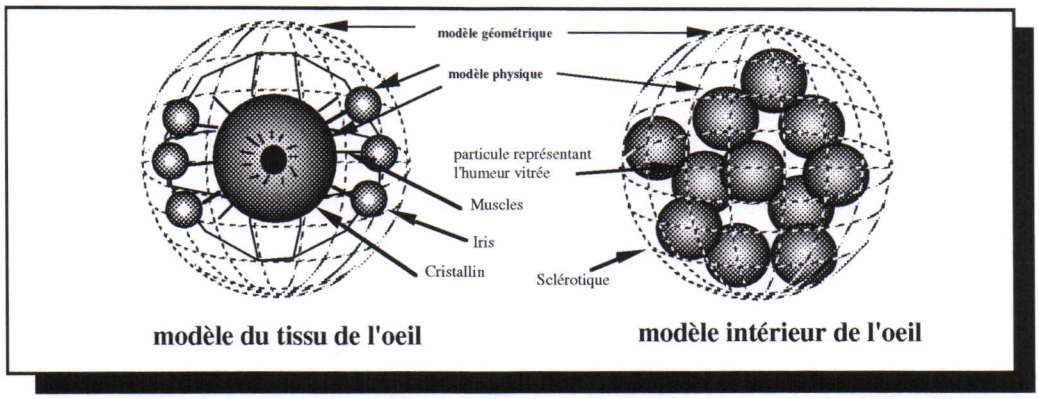


Figure 10.3 *: Modèle physique de l'oeil par des éléments de type CORDIS-ANIMA*

- La sclérotique est modélisée comme une sphère rigide par une seule masse ponctuelle, en interaction de non-pénétrabilité avec chacune des masses de l'humeur vitrée. Le seuil de cette fonction d'interaction représente le diamètre moyen de la sclérotique vue par les masses de l'humeur vitrée.

- Le scalpel est modélisé par une masse ponctuelle 3D à l'une de ses extrémités, un point 3D représenté par le stick externe 3D et une interaction viscoélastique de grande raideur entre ces deux points simulant la rigidité de l'outil. Il s'agit typiquement d'un instrument hybride 6D, dont une partie est réelle (stick 3D) et une partie est virtuelle (rigidité et masse ponctuelle d'embout.

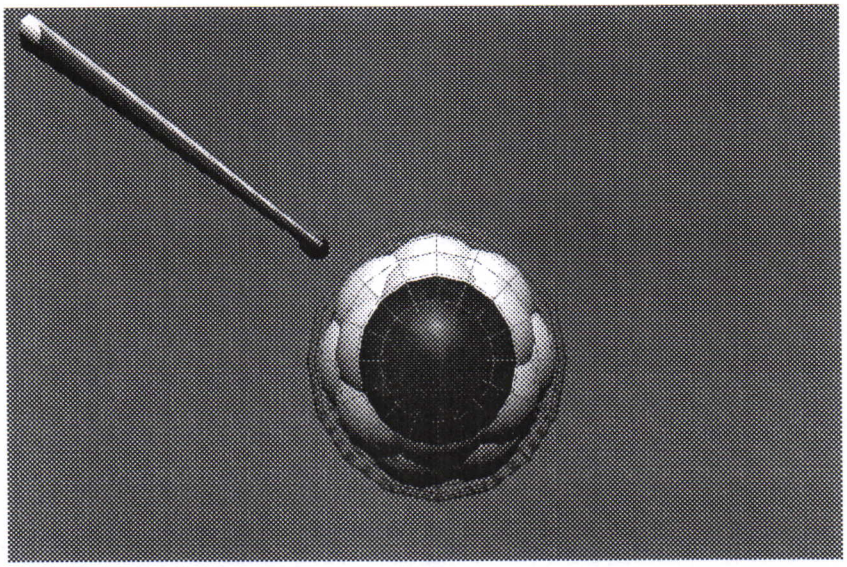


Figure 10.4 *: Modèle physique de l'oeil simulé*

- Le scalpel est en interaction physique avec le cristallin et l'humeur vitrée. Il n'est pas en interaction physique avec la sclérotique.

- la manipulation standard du scalpel se fera avec le stick 3D, connecté de manière permanente à l'extrémité manipulée du scalpel.

3.3. Les fonctions d'interactions

Dans ce qui précède, nous avons défini les caractéristiques des points matériels, qui ne possèdent pas de volume s'ils sont considérés seuls. Le volume d'un objet n'apparaît que lorsqu'il est en interaction de non-pénétrabilité avec un autre objet.

Dans cette tâche deux types de fonctions d'interactions entre les objets sont utilisées *(figure 10.5)* :

• Une *fonction d'interaction butée* permettant de simuler une répulsion entre deux objets (deux points matériels). Cette force de répulsion apparaît lorsque deux objets essayent de se rapprocher en dessous d'un certain seuil si les deux objets considérés sont pleins.

• Une *fonction d'interaction bulle* s'effectuant entre une sphère creuse et une bille pleine. Ces deux objets subissent une force qui tend à les rapprocher lorsqu'ils s'éloignent.

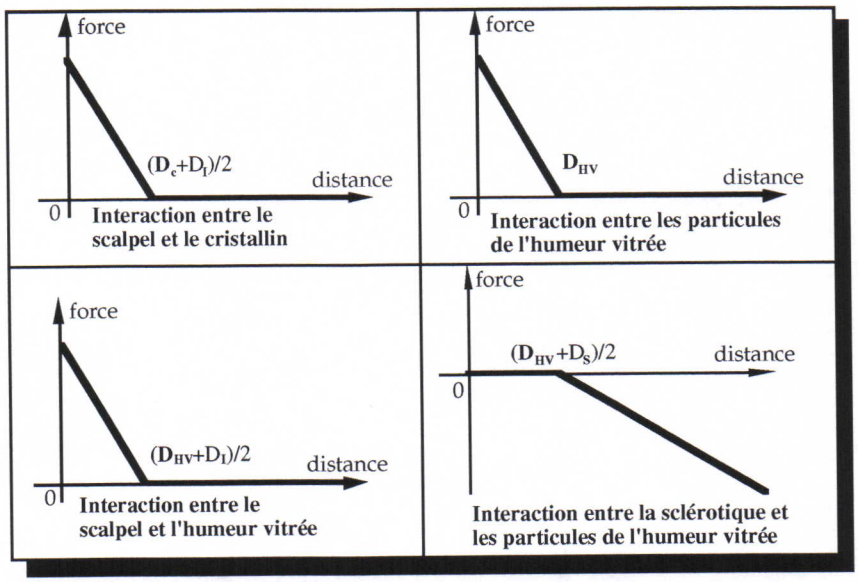


Figure 10.5 *: Fonctions d'interaction entre les différentes particules constituant l'oeil.*

Les seuils de ces fonctions d'interaction représentent les volumes extérieurs et intérieurs moyens apparents des masses ponctuelles en interaction.

3.4. Modèle géométrique de l'oeil

Les parties de l'œil pour lesquelles le comportement physique n'est pas important et qui ne sont pas en interaction avec l'utilisateur, ne sont pas modélisées par des modèles physiques mais uniquement par des modèles géométriques. C'est le cas de la pupille et l'iris*(figure 10.6)*.

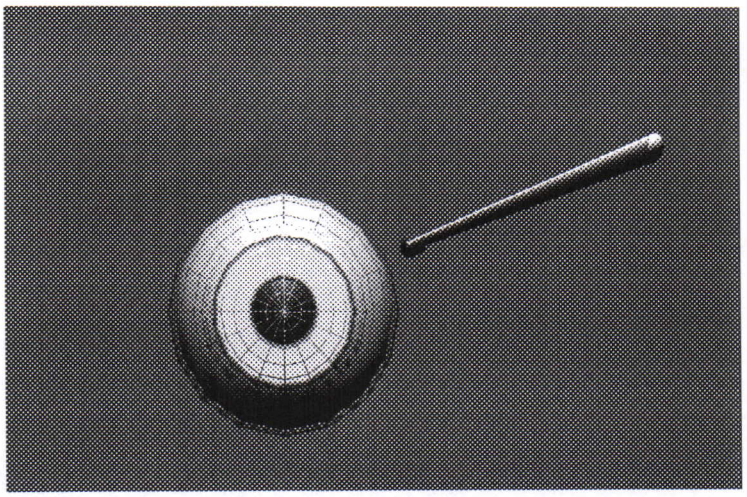


Figure 10.6: *Modèle géométrique de l'oeil*

3.5. L'outil de manipulation à retour d'effort : le stick 3D

Compte tenu de la géométrie du clavier, nous avons eu recours pour cette application à une structure mécanique en forme de stick 3D *(figure 10.7)* que nous avons montée sur trois touches du clavier.

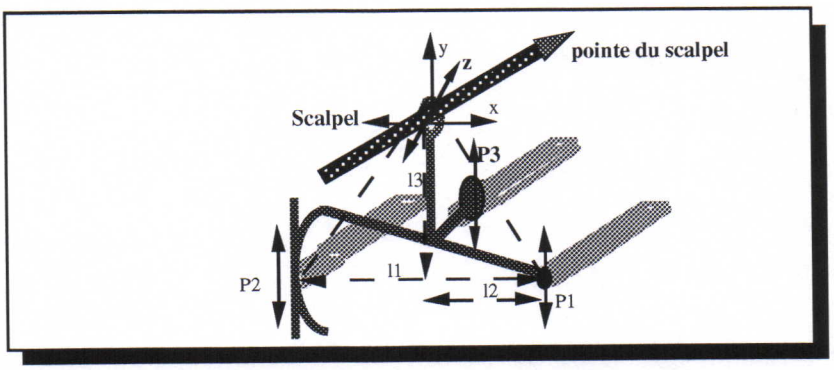


Figure 10.7: *Habillage Stick 3D avec scalpel*

Cet habillage est fixé sur trois touches du clavier. Les déplacements sur les axes des ordonnées et des abscisses sont déterminés à partir du déplacement de deux touches du clavier. Le déplacement en profondeur utilise une troisième touche.

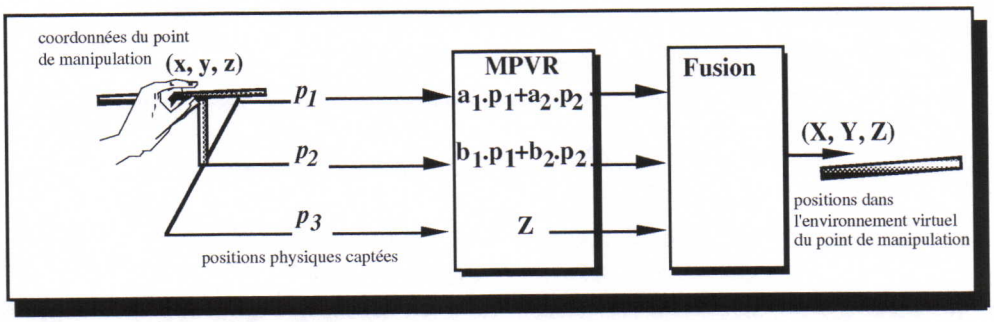


Figure 10.8 *: Transformations successives pour déterminer l'équivalence entre les coordonnées réelles et virtuelles.*

Pour obtenir un déplacement plan à partir du déplacement des deux touches parallèles, nous utilisons un module MPVR *(cf. Annexe C)*.

La représentation graphique du scalpel est en 3D ce qui permet d'avoir un certain réalisme. Les coordonnées mesurées sont utilisées pour déplacer la pointe du scalpel, mais nous les avons aussi utilisé pour effectuer la rotation de l'extrémité opposée à la pointe du scalpel pour donner l'illusion du geste réel.

Les trois touches se déplacent verticalement dans un intervalle de valeurs comprises entre -1,5 cm et 1,5 cm.

Les calculs suivants donnent les transformations entre les coordonnées P_1, P_2 et P_3 mesurées par les capteurs de positions montés sur les transducteurs (espace utilisateur), en un seul point se déplaçant en X, Y et Z à l'écran (espace tâche) ainsi que la transformations sur les forces en retour.

Sachant que l_1, l_2, l_3 sont les distances caractérisant le triangle formant le stick, on obtient le système suivant :

$$\begin{cases} X = -l_2.\cos(\frac{P_1 - P_2}{l_1}) - l_3.\sin(\frac{P_1 - P_2}{l_1}) + l_2 \\ Y = l_3.\cos(\frac{P_1 - P_2}{l_1}) - l_2.\sin(\frac{P_1 - P_2}{l_1}) - l_3 + P_1 \\ Z = P_3 \end{cases} \qquad \text{(Eq. 10.1)}$$

Pour la simplification des calculs nous avons fait une l'hypothèse que θ est petit ($sin(\theta)=\theta$, $cos(\theta)=1$), d'où les égalités (Eq. 10.1) deviennent alors :

$$\begin{cases} X = -l_3.(\frac{P_1 - P_2}{l_1}) \\ Y = -l_2.(\frac{P_1 - P_2}{l_1}) + P_1 \\ Z = P_3 \end{cases} \qquad \text{(Eq. 10.2)}$$

Le stick représente un triangle équilatéral, d'où les simplifications suivantes:
$l_2 = l_1/2$; l_3= 1,73 11 avec l_1 = 13,75 cm (valeur correspondant à la distance séparant 11 touches consécutives du clavier)

Pour les coordonnées des touches à l'écran on va utiliser la transformation géométrique :

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 0 \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} . \begin{pmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \end{pmatrix} \qquad \text{(Eq. 10.3)}$$

Nous pouvons donc déduire la matrice de transformation des forces vers l'opérateur :

$$\begin{pmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{2} & 0 \\ \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} . \begin{pmatrix} F_X \\ F_Y \\ F_Z \end{pmatrix} \qquad \text{(Eq. 10.4)}$$

Le module MPVR est composé de la matrice de (Eq. 10.3) en entrée, et de la matrice de (Eq. 10.4) en sortie (dans ce calcul nous n'avons pas tenu compte des facteurs d'échelle et de calibrage *(§Chapitre 6)*.

4. Différentes anamorphoses possibles

Nous citons simplement sans les étudier différents cas de transformations de l'espace de manipulation et de l'espace d'observation. Ils résultent des études précédentes.

4.1. Anamorphose gestuelle

La manipulation standard que nous avons implémenter est celle de la manipulation d'un point 3D, qui est un point extrémité d'un scalpel 6D.

Nous pourrions étudier diverses morphologies d'outils et de manipulation par découplage et/ou transformation des différents degrés de liberté, un cas extrême étant celui de la manipulation des 3 degrés de liberté indépendamment par des touches du clavier indépendantes et selon des axes orthonormés. Les critères seraient ceux déterminés précédemment : rapidité d'apprentissage, précision et rapidité du pointage. Dans les cas où les performances seraient meilleures que dans la manipulation sur les outils conventionnels, un critère nouveau serait ici l'acceptation de la nouvelle situation par les habitués-experts et la transmission de l'expertise.

En ce qui concerne, la manipulation de l'outil d'observation de l'oeil, il serait intéressant de voir si le retour d'effort offre une pertinence.

4.2. Anamorphose visuelle

Dans la situation de chirurgie effective de l'oeil, comme la plupart de situations instrumentales, l'observation visuelle des objets manipulés est médiatisée par un outil d'observation, qui est dans ce cas un système de vision à trois miroirs [Mes97]. Là encore l'étude de différentes relations dans la visualisation est possible et fondamentale, pouvant conduire à déterminer des systèmes meilleurs que les systèmes conventionnels.

4.3. Anamorphose geste/vison

L'anamorphose dans la coordination visuo-manuelle est une anamorphose d'*échelle*. Dans la situation implémentée, le déplacement effectué par le geste varie entre -2,5 cm et 2,5 cm pour l'axe des abscisses et -1,5 et 1,5 pour l'axe des ordonnées, et le déplacement observé peut varier entre -17 cm et 17 cm pour l'axe des abscisses et entre -13,5 cm et 13,5 cm pour l'axe des ordonnées. Cette situation d'anamorphose n'influe pas beaucoup sur les performances de l'utilisateur. L'étude de sa variabilité est de peu d'intérêt car généralement, on arrive à synchroniser notre geste au déplacement que nous observons.

5. Implémentation des différentes situations d'apprentissage

5.1. Mode d'entraînement direct

Dans ce mode l'utilisateur agit directement sur le scalpel virtuel à l'aide du scalpel réel. Le déplacement effectué par le scalpel réel est transmis directement à la simulation et la force de réaction entre le scalpel virtuel et l'oeil est transmise directement vers le chirurgien débutant *(figure 10.9)*.

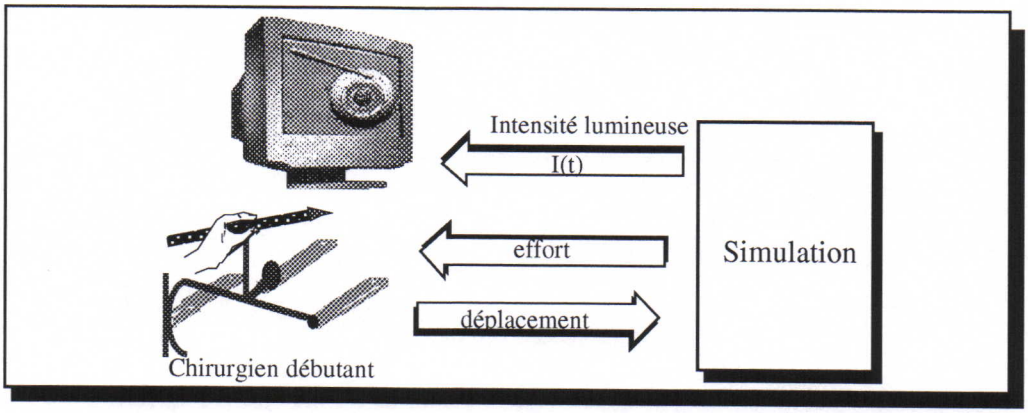


Figure 10.9: *Mode d'entraînement direct*

5.2. Mode d'entraînement supervisé

Pour ce mode d'entraînement le scalpel manipulé par le chirurgien débutant et celui manipulé par le chirurgien expert sont liées par une liaison viscoélastique rigide 3D (§C.9.3.2) au même scalpel virtuel se trouvant dans la scène simulée. Le déplacement effectué par l'un ou l'autre des chirurgiens agissant sur leurs scalpels respectifs est transmis en même temps à la simulation et à l'autre chirurgien. Ainsi, le chirurgien expert peut suivre les mouvements du chirurgien débutant et le corriger en temps réel si celui-ci se trompe.

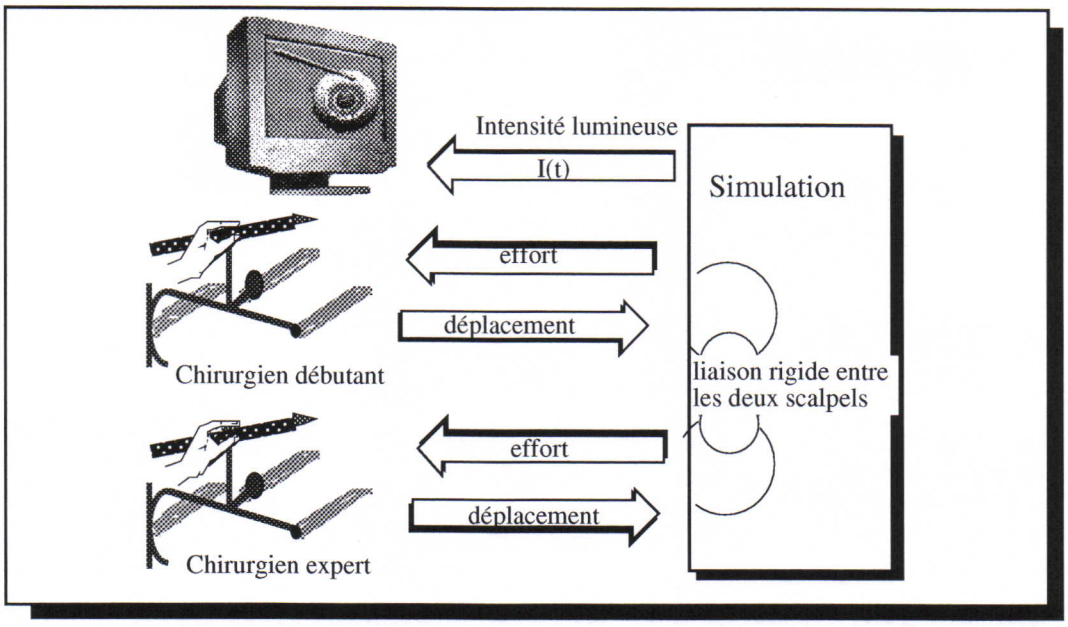


Figure 10.10: *Mode d'entraînement supervisé*

5.3. Mode d'entraînement avec assistance différée

Dans ce mode d'entraînement, il existe deux étapes différentes :

La première étape *(figure 10.11)* est l'enregistrement du geste du chirurgien expert. Pour cela, au moment de la manipulation du chirurgien expert du scalpel nous effectuons l'enregistrement des déplacements qu'il effectue avant traitement par la simulation.

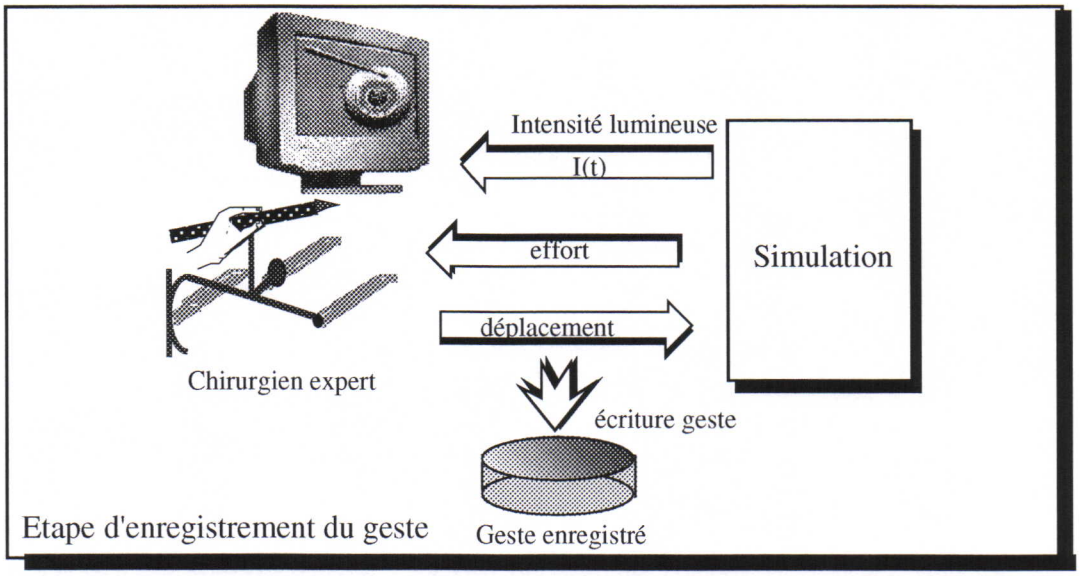


Figure 10.11: *Enregistrement du geste par le chirurgien expert*

La seconde étape *(figure 10.12)* est l'entraînement du chirurgien débutant par l'utilisation du geste enregistré. Dans ce cas le déplacement du chirurgien est guidé par le scalpel, car la

simulation ne va pas utiliser le déplacement capté au niveau du scalpel, mais le déplacement du geste enregistré au préalable.

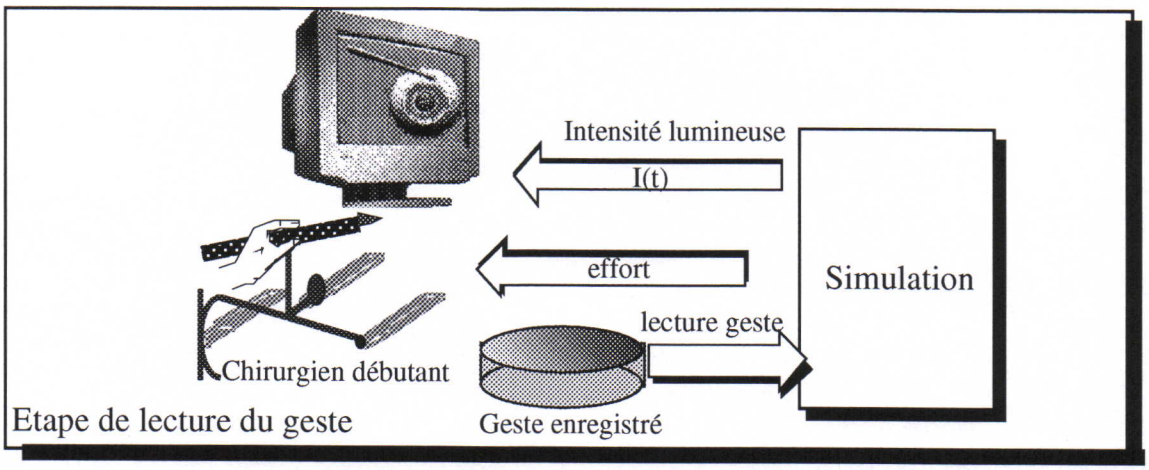


***Figure 10.12** : Mode d'entraînement à partie d'un geste enregistré*

6. Conclusion et perpectives

Dans ce travail nous avons illustrer par un exemple notre méthode de conception de tâche sensori-motrice, et montré les possibilités offertes par un instrument virtuel dans les tâches d'apprentissage gestuel, cet instrument pouvant être manipulé simultanément par deux utilisateurs, ou de ré-observer "tactilement" un geste précédemment effectué, situations impossibles avec un instrument réel.

Pour une étude plus approfondie du geste chirurgical, il faudrait un modèle plus raffiné et plus réaliste de l'oeil avec la possibilité de réaliser des incisions, avec une vraie texture d'oeil (obtenue à partir d'une image scanée). Aussi il serait intéressant d'étudier le comportement des tissus de l'oeil et de faire un modèle d'interactions le plus fidèle possible, de réaliser une segmentation des différentes parties de l'oeil, de façon à déterminer les caractéristiques de son enveloppe externe, et ainsi pouvoir modéliser les différents vaisseaux de l'oeil. On peut même envisager d'intégrer un visage humain pour augmenter le réalisme de la simulation si nécessaire.

Deux types de travaux peuvent à présent être menés :

- d'une part, l'étude des gestes proprement dits à partir d'une maquette d'outil à retour d'effort à morphologie variable, permettant de tester quantitativement et psychologiquement différentes situations d'anamorphoses manipulatoires.

- d'autre part, la réalisation d'un instrument dédié à ce type de tâche. Cet instrument peut être soit une reproduction de la situation conventionnelle, soit un nouvel instrument à mettre à l'essai .

Dans notre application, nous avons pris l'exemple de l'oeil, mais la méthodologie développée ici pourra être généralisée à d'autres opérations chirurgicales.

Conclusion et Perspectives

Après la présentation de différentes taxonomies déjà proposées [Bux83][Mac90][Lip95], nous avons défini une taxonomie pour la caractérisation des interfaces à retour proprio-tactilo-kinesthésique.

Nous nous sommes intéressé par la suite, plus particulièrement à l'utilisateur humain lors d'actions instrumentales. A partir du concept d'anamorphose, nous avons mis en oeuvre une esquisse de méthodologie ayant pour objectif de mettre au point des critères de mesure des performances de l'utilisateur relativement à une situation de référence. Un cas particulier est celui où la situation de référence choisie correspond à une situation d'action instrumentale précédemment pratiquée. La nouveauté de la situation par rapport aux études précédentes est le fait que le retour d'effort est programmable et que les objets manipulés ainsi que les instruments peuvent être soumis à une grande variabilité par le biais de la simulation.

Dans notre partie expérimentation, nous avons pu étudié les influences de diverses transformations des situations de manipulations et en particulier le rôle du retour d'effort conjointement au retour visuel.

Nous avons présenté une méthode de caractérisation des tâches sensori-motrices dans un environnement de simulation par modèle physique basé sur les propriétés physiques d'une tâche. La méthode décrite prend en compte les étapes de la tâche, ses contraintes temporelles

et spatiales mais aussi les performances de l'opérateur et les caractéristiques de l'environnement.

Nous avons déterminé le seuil différentiel pour la raideur entre le pouce et l'index (le poignet est libre) avec notre dispositif à retour d'effort à ~10 %. Nous pensons qu'il y a une intervention de la perception tactile en plus de la perception kinesthésique, d'où l'amélioration de la précision. A noter que le seuil de discrimination tactile est de 5 % [Bus82]. Le seuil absolu dépend largement du dispositif d'expérimentation utilisé. Dans notre cas nous avons obtenu un seuil absolu de 0,1 N/cm, ceci avec un frottement faible mais perceptible par les sujets.

La performance "temps-précision" augmente avec la raideur. De cette mesure il faut comprendre que l'utilisateur est sensible à la raideur et qu'il existe une valeur optimale de raideur pour la meilleure précision de l'interaction. Mais ceci devrait être vérifié pour d'autres valeurs de raideurs et d'amortissement.

Les performances globales du sujet sont meilleures lorsque nous avons en même temps du retour d'effort et du retour visuel. Mais la précision est la même que celle obtenue avec retour d'effort, donc on peut dire que le retour d'effort améliore la précision, et la vision améliore la vitesse. Dans certaines situations d'anamorphoses (le curseur rotatif en est un exemple), bien que le retour visuel augmente la vitesse de positionnement, les sujets ont tendance à fermer les yeux car ce retour visuel à tendance à diminuer la précision.

Quand aux les lois de Fitts et Meyer, elles sont vérifiées pour les situations expérimentales de positionnement rectiligne, mais pas pour la situation sans retour visuel pour le positionnement rotatif. Ceci est dû au fait que dans une trajectoire fermée les cibles qui sont trop près du curseur ne sont pas perçues au premier passage.

Ce travail a été clôturé par une application pour l'entraînement chirurgical où nous avons montré l'intérêt du simulateur à retour d'effort pour l'expérimentation de diverses situations d'apprentissage. Nous avons montré les possibilités offertes par un instrument virtuel dans les tâches d'apprentissage. Cet instrument peut, entre autres, être manipulé en même temps par deux utilisateurs, chose impossible avec un instrument réel. Pour que ce travail puisse être utilisé pour la simulation d'opérations chirurgicales, certaines évolutions sont nécessaires.

Tout au long de ce travail, nous avons étudié les avantages de l'utilisation du retour d'effort dans des applications de manipulation d'objets physiques et les conditions de son intégration dans la boucle Homme-Machine. Le dispositif étudié est un dispositif à degrés de libertés découplés permettant ainsi d'avoir plusieurs morphologies. Mais le changement de morphologie suppose un changement dans la géométrie de l'interface matérielle mais aussi logicielle en tenant compte des capacités et des habitudes de l'utilisateur.

Avec un outil à retour d'effort à morphologie flexible, d'autres situations d'anamorphoses de la situation instrumentale multisensorielle doivent être expérimentées pour comprendre leurs performances et concevoir des dispositifs optimaux.

L'étude des seuils de sensibilités pour la viscosité et la masse est une étape intéressante pour comprendre les perceptions de l'utilisateur et pouvoir mieux lui adapter l'interface.

La réalisation des habillages mécaniques variés et l'évolution de l'application de chirurgie est une des perspectives de ce travail, ainsi que le montage de capteurs de force et de vitesse sur le dispositif à retour d'effort pour améliorer la performance de la manipulation et pouvoir effectuer des mesures de caractéristiques plus précises de l'utilisateur.

Annexes

Annexe A

Les dispositifs à retour d'effort

Dans ce qui suit nous allons présenter quelques interfaces à retour d'effort, dont certaines sont encore au stade de prototypes et d'autres sont déjà commercialisées. Ces interfaces ont des morphologies différentes, des caractéristiques différentes que nous essayerons de classer à la fin de cette annexe.

1. Les joysticks

La plupart des dispositifs développés possèdent une morphologie de joystick. Un joystick est un manche que nous pouvons déplacer sur 2, 3 ou même six dimensions. Les joysticks ont l'avantage d'être légers ce qui les rends facilement transportables.

Plusieurs joysticks à retour d'effort ont été développés, nous en présenterons quelques uns dans cette première section.

1.1. Le joystick à deux degrés de liberté de MINSKY et al

Il s'agit d'un système à deux degrés de libertés utilisant des moteurs à courant continu. La position du joystick est transmise a la machine de traitement qui calcule les forces appropriées pour commander les moteurs.

Ce dispositif a été conçu pour étudier la perception tactile humaine, et comprendre l'apport d'un tel dispositif dans la perception des environnements virtuels. Ces objectifs sont donc : premièrement, de fournir une base flexible pour tester la perception humaine de la rugosité en créant les stimuli nécessaires, deuxièmement, la détermination des différences entre la perception des textures crées par ordinateur et celles réelles, et montrer l'intérêt d'une telle illusion dans la simulation des environnements virtuels. Les études pilotes de la perception de rugosité montrent qu'il est possible de créer avec succès des degrés différents de sensation de rugosité.

Les surfaces finement granulées sont réalisées par le calcul des forces d'attractions d'un gradient local : l'utilisateur en se déplaçant avec le joystick sur la surface virtuelle, note le changement de hauteur de son mouvement. La force de texture est calculée en temps réel à partir de la profondeur de la texture du plan.

$$Fx = A \frac{\Delta h}{\Delta x}$$

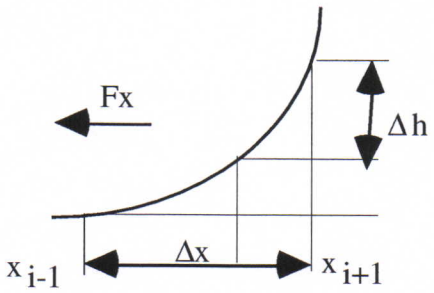


Figure A.1 : *Technique du gradient, détail du calcul de la force locale dans la direction des x(on a la même chose pour les y)*

1.2. Le joystick de commande de MATRA-ESPACE

Dispositif développé par MATRA, le "ROBOTOP" est un manche de commande à retour d'effort, sous forme d'une poignée de pilotage à trois degrés de liberté, dotée de capteurs de force et de moteurs. Ce dispositif a été construit pour la téléopération d'un bras de robot où l'on retrouve le concept bras-maître/bras-esclave et l'interaction avec un environnement virtuel produit par ordinateur. Le conditionnement du retour d'effort se fait dans une machine qui reçoit les signaux des capteurs de force et fournit les signaux de retours à un étage de puissance qui commande les moteurs.

1.3. Le Compact Master Manipulator (CMM)

Construit par Iwata [Iwa90] à l'Université de Tsukuba au Japon, le CMM est un dispositif à retour d'effort avec une force de retour d'environ 30 N.

Le but des travaux d'Iwata est l'implémentation du retour d'effort dans un système de manipulation d'objets virtuels. Le système de visualisation est basé sur un dispositif à miroir placé devant l'utilisateur pour réfléchir l'image de l'écran. L'utilisateur ne voit pas le monde physique, mais il voit celui généré par ordinateur qui inclue sa main. Cette configuration optique plonge l'utilisateur dans le monde virtuel. La représentation graphique de la main articulée est affichée en correspondance avec la position et l'orientation de la main de l'utilisateur, données par le Compact Master. Le mouvement de la main de l'utilisateur est mesuré par les capteurs de positions du manipulateur à 9 degrés de liberté. La position et l'orientation de la main sont décrites dans un système de coordonnées, fixé dans l'espace virtuel. Les objets visualisés sont décrits dans le même système de coordonnées. L'élément de base du manipulateur est un système à six degrés de liberté parallèles. La réalisation typique d'un manipulateur parallèle est un octaèdre, constitué de deux plates-formes triangulaires, l'une constituant le sommet et l'autre la base. Cette structure a un inconvénient pratique, son volume de travail est trop faible et la commande du système est difficile à cause du manque de friction du mécanisme.

L'espace de travail du centre du haut de la plate-forme est un volume sphérique dont le diamètre est approximativement de 30 cm. Le retour de force maximal du manipulateur parallèle est d'environ 23 N. Chaque angle de joint du manipulateur est mesuré par des capteurs de position d'une précision de 1%. Le haut de la plate-forme du manipulateur parallèle est fixé à la paume de l'opérateur par une attache en U, qui permet à l'utilisateur de déplacer sa main et ses doigts indépendamment. Trois actionneurs sont disposés coaxialement avec le premier joint du pouce, de l'index, et les trois derniers doigts sont liées au même actionneurs. Le couple maximal applicable par un actionneur est de 30 N/cm. L'angle de travail pour le pouce est de 120 degrés et de 90 degrés pour les autres doigts.

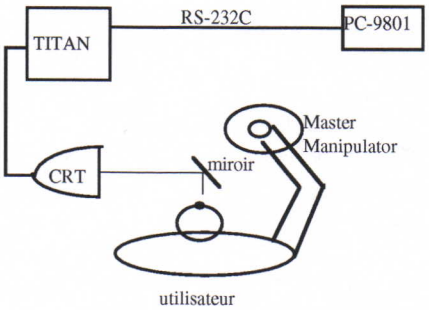


Figure A.2 : *Configuration générale du système [Iwa90]*

Iwata a aussi développé un second système à retour d'effort basé sur le même principe des pantographes que le premier dispositif. Il s'agit d'un système à six degrés de liberté utilisant un mécanisme parallèle pour appliquer une force sur les doigts de l'opérateur. Le manche saisi par l'opérateur est supporté par trois ensembles de pantographes.

Le volume de travail est un volume sphérique d'à peu près 40 cm. La force maximale développée par le système est de 25 N.

Avec ce système, l'opérateur a la possibilité de sentir trois types d'objets virtuels :

- surface dure,
- surface élastique,
- propagation de fluide.

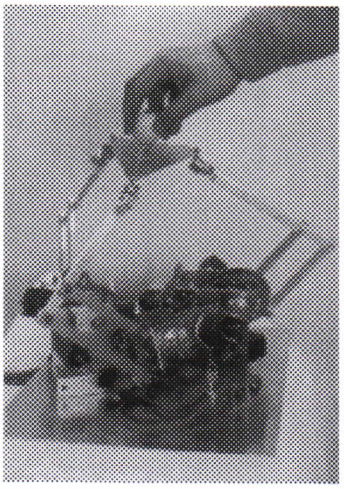


Figure A.3 : *Le stick 6D d'Iwata*

1.4. Le joystick 2D de Haptic Technologie

Il s'agit d'un pantographe [Ram94] à retour d'effort. Il possède une bande passante d'environ 300 Hz, avec une optimisation de l'encombrement (16 cm x 10 cm) qui représente aussi l'espace de travail décrit par le joystick. Ce joystick est constitué de 5 liaisons mises bout à bout, fermées par des moteurs à chaque bout *(Figure A.4)*.

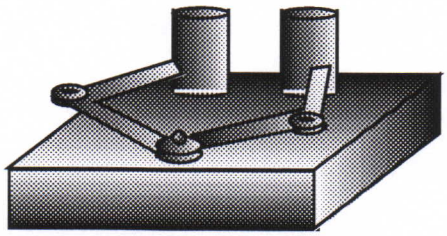


Figure A.4 : *Le stick 2D de Haptic Master*

L'architecture de ce système est bien adapté pour des morphologies stick, souris, ... Il est commercialisé par Haptic Technologie au Canada autour de 7000 $.

1.5. PowerStick d'Exos

Ce joystick est développé pour la simulation de retour de force dans les jeux. Le système d'Exos [Ex96] possède son propre processeur, le calcul des forces d'interactions se fait par le stick et non pas par la machine de simulation pour ne pas la ralentir. Le joystick permet la simulation de force constante, des amortissements et de l'élasticité. La simulation de ces forces est faite par des équations dynamiques. Ce système est livré avec une bibliothèque de

fonctions C pour faciliter sa programmation. Sa date de commercialisation est prévue pour la fin de l'année 1996. Par contre, son prix et ses performances ne sont pas encore divulgués.

1.6. Per-Force

Il s'agit d'un dispositif commercialisé par Per-Force [PF96], de taille réduite qui se déplace sur six degrés de liberté, 3 linéaires et 3 angulaires. Au départ ce dispositif a été conçu pour les tâches de télémanipulation dans la station spatiale. Il est livré avec une bibliothèque d'objets C sous MS-DOS.

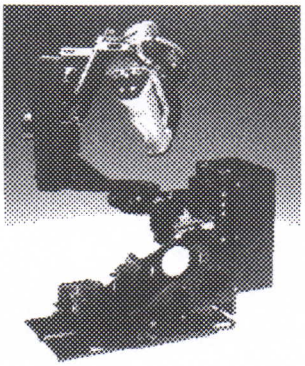


Figure A.5 *: Dispositif à retour d'effort développé par Per-Force.*

1.7. Impulse Engine

Les dispositifs commercialisés par Immersion Technologie [IT96] sont au nombre de trois : le premier est un dispositif à deux degrés de liberté rotatif, le second est un dispositif à six degrés de liberté dont trois uniquement sont considérés pour la mesure de positions et la sortie de force. Le dernier dispositif est un dispositif à cinq degrés de liberté ayant la morphologie d'un instrument de 'Labroscopie'.

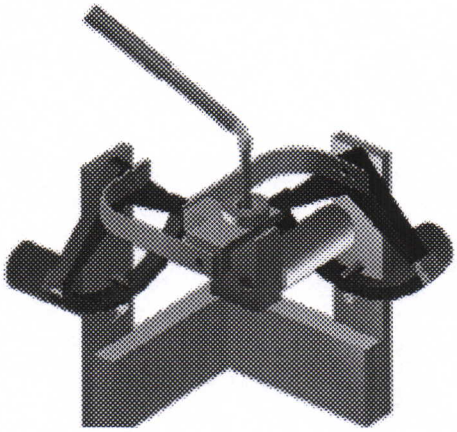


Figure A.6 : Stick à 3 degrés de liberté développé par Immersion

1.8. Pen-Based Device

Il s'agit d'un système à trois degrés de liberté [But95] permettant de simuler des raideurs pouvant aller jusqu'à 30 N/cm et un échantillonnage à 5 Khz. Les objets sont simulés par un modèle de ressort, masse, viscosité.

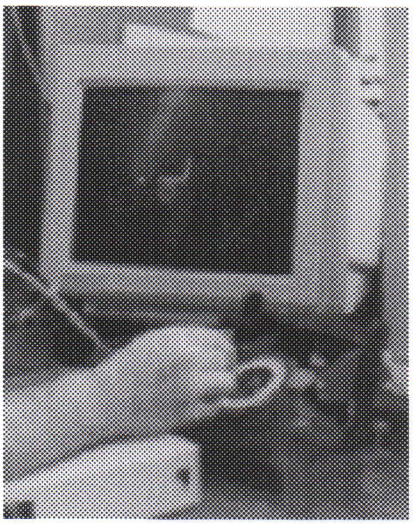


Figure A.7 : *Stick 3D de P.Buttolo*

1.9. Mini Direct-Drive Robot

Ce dispositif [Mor95] est conçu pour manipuler des objets de petites tailles et fragiles avec une grande précision, tels que la préparation de gels d'éléctrophorèses en recherche génétique, ou la manipulation de micro-circuits électriques sur des cartes à très grandes densités d'intégrations.

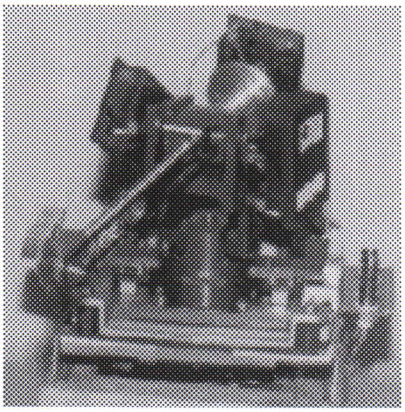


Figure A.8 : *La Mini-Direct Drive Robot*

Les caractéristiques de ce dispositif sont les suivantes :

* l'environnement de travail est de 120 cm^3,

* une précision de position de 6 µm,
* 5 Degrés de liberté,
* fréquence d'échantillonnage de 1 Khz,
* Résonance mécanique minimale de 83 Hz,
* Manipulation directe d'objets de très petites tailles.

2. Les Exosquelettes

2.1. Le Rutger Portable Master

Trois micro-vérins pneumatiques liés par une plate-forme en L sont fixés sur un gant de données [Bur93]. La plate-forme est fixée sur la paume de la main de l'utilisateur. Les vérins sont placés dans une configuration évitant l'utilisation de câbles et de poulies, ce qui, par voie de conséquence, simplifie la conception et réduit le poids de la structure de retour d'effort à seulement 45g. Chaque vérin est monté coaxialement à une articulation sphérique permettant ainsi une connexion directe avec les tubes d'alimentation en air qui passent à travers les articulations sphériques.

Chaque actionneur a un environnement de travail conique autorisant tout à la fois la flexion et l'abduction/adduction des doigts. Les vérins sont fixés au gant par des bandes de Velcro qui permettent un ajustement aux différentes tailles des mains des opérateurs. Chaque vérin produit une force de 4 Newtons avec une pression d'air de 90 Psi. La bande passante est d'environ 11 à 14 Hz et dépend du modèle utilisé comme contrôleur de pression d'air. Dans sa configuration de base en tant que système isolé, le gant Rutger ne permet pas d'avoir une sensibilité au poids des objets puisque aucun retour de force n'est appliqué sur le poignet.

Burdea [Bur93] a complété le système par un retour sur le poignet en utilisant un bras maître à six degrés de liberté de NASA/JPL.

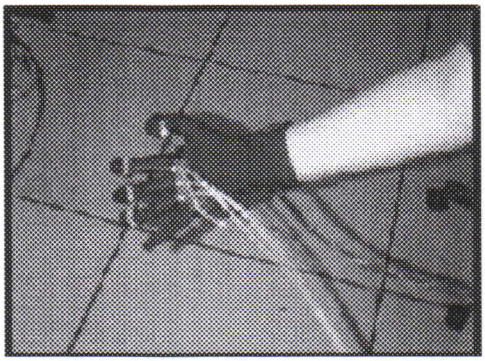


Figure A.9 : *Le gant à retour d'effort de l'université de Rutger*

2.2. Le "LRP" Portable Master

Un système maître portable doté de plus de degrés de liberté que le gant de l'université Rutger a été développé au laboratoire de robotique de Paris (LRP). Il fournit un retour de force sur la main.

Les retours d'effort restent normaux aux segments des doigts pour la plupart des mouvements de saisie. Ceci résulte de la conception mécanique adoptée. Les actionneurs sont situés loin de la main afin d'alléger le poids des éléments supportés par la main. La commande s'effectue par des micro-câbles (de 0,45 mm de diamètre). Le déplacement des câbles est mesuré par des potentiomètres montés sur chaque axe d'actionneur, ce qui permet d'atteindre une résolution de 1 degré. Ces données sont alors utilisées pour estimer la posture de la main. Les câbles passent sur le dos de la main ce qui laisse la paume libre, ainsi que la possibilité de saisir un objet réel tout en portant l'équipement, permettant ainsi d'accroître ses fonctionnalités.

L'utilisation de câbles et de poulies fait intervenir des jeux et des frottements qui rendent le contrôle difficile. Des capteurs de forces miniatures acceptant une charge de 100 Newtons sont placés sur le dos de la main afin de régulariser les tensions des câbles, pour augmenter la précision des moteurs à courant continue dont le couple continu peut atteindre 1,07 N.m et des pics de 11,48 N.m.

3. Bras manipulateur

3.1. Le projet Grope

Le projet Grope [Bro90] a commencé en 1967, le but était de réaliser un système de retour de force à six degrés de liberté et un système de visualisation pour l'interaction des molécules de protéines.

Le système réalisé est constitué d'un bras à six degrés de liberté, muni d'une poignée. Le système de visualisation utilisé pendant l'expérience est un E & S PS-330.

3.2. Le Phantom

C'est un dispositif développé au laboratoire d'intelligence du MIT par Thomas Massie sous la direction de Kenneth Salisbury, et distribué par SensAble Devices. Inc.

Le Phantom contient trois moteurs qui contrôlent les forces exercées sur le doigt au niveau des axes x, y, z sous l'effet d'un déplacement. Chaque moteur possède un encodeur optique pour déterminer les positions x, y, z du doigt de l'opérateur. Le couple du moteur est transmis à travers un câble à une structure rigide et légère.

Au bout de cette liaison, un cardan est attaché à une sorte de dé à coudre sur lequel vient se fixer le doigt. Le cardan passif permet au dé de tourner de façon que l'opérateur puisse

réaliser tous les mouvements confortablement. Le doigt de l'utilisateur est modélisé comme un point ou une sphère de friction dans le monde virtuel. Le système a un faible frottement, une faible inertie et un poids équilibré ce qui permet un déplacement assez fluide dans l'environnement virtuel.

Le système Phantom est très bien adapté aux tâches s'effectuant dans un environnement 3D. La substitution du dé par un stylo permet de transformer le système en une interface d'écriture virtuelle. Il est aussi possible de transformer le système en instrument chirurgical permettant ainsi à un chirurgien d'effectuer des opérations virtuelles.

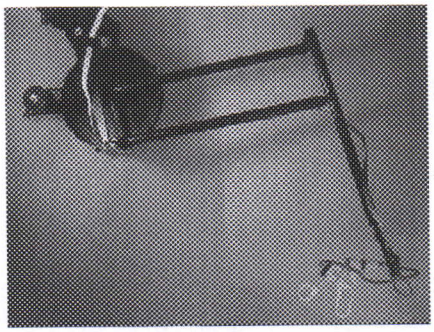


Figure A.10 : *Le dispositif Phantom développé au MIT*

4. Clavier

4.2. Le clavier à retour d'effort du CCRMA

Développé par Brent Gillespie [Gil92], il s'agit d'un piano à retour d'effort utilisant un ensemble de degrés de liberté découplés. Le but était de réaliser un clavier permettant à un synthétiseur de fournir les mêmes interactions qu'un piano réel.

L'avantage de cette structure est la possibilité de simuler des claviers musicaux autres que le piano, uniquement par le changement des paramètres du simulateur.

La sensation de piano est simulée par l'intégration numérique de l'équation du mouvement du piano en temps réel.

5. Tableau récapitulatif

Les caractéristiques que nous utilisons dans notre taxonomie (Chapitre 1) ne sont pas toujours disponibles, d'où les cases vides dans le tableau.

	Bande passante	Sortie force de Retour Maximale	Nombre de degrés de liberté	Résolution en position	Déplacement	Morphologie (Référentiel)	Espace de travail
Rutger Portable Master	11 à 14 Hz	4 N	4		translation	gant (relatif)	
LRP Portable Master		1-11,48 N	14	1	rotation	gant (relatif)	
Exos		0,7 N			rotation	gant (relatif)	
Minsky & al	1000 Hz		2		rotation	stick (absolu)	
Compact Master - Iwata	10 Hz	30 N	9		rotation	stick (absolu)	
Ramstein		10 N	2	0,01 mm	rotation	stick (absolu)	10x16 cm^2
LAAS Toulouse			6		translation	stick (absolu)	
Matra Espace			3		rotation	stick (absolu)	
Grope	20 à 80 Hz		6		rotation	bras (absolu)	
Phantom	1000 Hz	8,5 N	3	0,07 mm	rotation	bras (absolu)	8x17x25 cm^3
CEA					rotation	bras (absolu)	
CRM-ACROE	300 à 1000 Hz	40-80N	16	0,4µm	translation	clavier (absolu)	3 cm Par degré
Clavier du CCRMA					rotation	clavier (absolu)	
Impulse Engine	120 Hz	8,9N	3	0,0009" (1100 dpi)	translation	stick (absolu)	13x23x23 cm^3
	650 Hz		3		rotation		
PER-Force		5- 40 N 90-113 N	3 6	0,0003"	rotation	stick (absolu) stick	
Exos PowerStick	10 Hz		2		rotation	stick (absolu)	
Pen-Based Device (Université de Washington)		0,5-2 N	3	0,015 mm	rotation	stick (absolu)	15x15x15 mm^3

Tableau A.1: *Récapitulatif des caractéristiques des différents systèmes à retour de force*

Conclusion

Dans cette annexe, nous avons présenté quelques dispositifs à retour de force et nous avons constaté que les caractéristiques des dispositifs ne sont pas toujours fournis. Généralement, ces dispositifs sont soit des dispositifs expérimentaux donc ne sont utilisés que dans les milieux où ils sont développés. Pour les dispositifs commerciaux, les caractéristiques disponibles sont plus nombreuses et permettent déjà avoir une idée sur les possibilités offerte par le dispositif.

De cette étude nous avons pu déduire que les systèmes les plus développés sont des systèmes ayant la morphologie stick et ceci pour plusieurs raisons :

- ces systèmes sont facilement portable et transportable d'une plate-forme à une autre,

- une grande partie des applications nécessites au plus 3 DDL,

- le système n'est pas cher à la réalisation d'où sa plus grande diffusion,

- sa morphologie lui permet d'être adapté à différentes applications.

- La plupart de ces systèmes sont réalisés pour des plates-formes PC ou Macintosh ce qui permet une plus grande diffusion.

Annexe B

Taxonomie de J.S. Lipscomb

Cette taxonomie a été évoqué au Chapitre 1, et dans ce qui suit nous décrivons chaque noeud des deux graphes constituant cette taxonomie.

• Caractéristiques touchant toute la structure du dispositif :

Niveau 1 :

- Dimension : les dispositifs 1 DDL, 2 DDL, 3 DDL, etc. le système possède le même nombre de degrés de liberté pour chaque main ou chaque doigt. Par exemple, une souris à trois boutons possède deux axes, un pour les abscisses et un autre pour les ordonnées, ce qui fait un système à 2 DDL. Les trois boutons peuvent être considéré comme un seul ou plusieurs dispositifs séparés, ou comme partie du dispositif total. Un joystick à plusieurs axes peut être facilement substitué par un ensemble de joysticks à un seul axe. Dans la manipulation de molécules, plusieurs manches à un DDL sont plus efficaces qu'un seul système multi-degrés de libertés [Bro85].

Niveau 2 :

- *Libre* : les dispositifs découplés ont plus d'un degré de liberté, mais l'utilisateur perçoit un environnement uniforme. Ils sont faciles à déplacer dans n'importe quelle direction, mais exigent de la dextérité et de l'expérience pour déplacer le dispositif avec précision sur un axe donné. Par exemple, on peut difficilement déplacer la souris sur un axe avec une très grande précision.

- *Contraint :* le dispositif a des frontières évitant l'activation accidentelle d'un axe quand un autre axe est utilisé. Ces frontières sont souvent réalisées mécaniquement ou électriquement. Ces dispositifs sont intéressant lorsque l'on veut décomposé le mouvement selon un axe déterminé à chaque fois. Le "Rubik Cube" est constitué d'une telle mécanique, lorsque l'on tourne une face du cube l'autre face est bloquée.

Niveau 3:

- *Dépendant :* Pour effectuer un déplacement tous les axes se déplacent parce qu'ils sont liés physiquement entre eux. Par exemple, un manipulateur parallèle [Mer95] utilise une composition de tous ces axes pour effectuer une rotation. Ce type de dispositif est intéressant pour réaliser des rotations avec des actionneurs linéaires.

- *Orthogonale* : les dispositifs orthogonaux ont leurs axes fixé dans un repère de références, souvent parallèle aux axes du moniteur graphique, la plupart des dispositifs 2D, trackball et tablette tactile constituent des dispositifs orthogonaux, L'activation d'un axe ne change rien sur les autres axes. Une souris est orthogonale si elle récupère des coordonnées séparés. Les positions x et y mesurées ne sont pas influencés par les rotations autours du poignet de l'utilisateurs et restent fixent.

• Caractéristiques physiques touchant un axe de la structures du dispositif :

Certaines propriétés du dispositif physique sont propres à un seul axe de liberté indépendamment des autres. Ces propriétés sont les suivantes :

Niveau 4 :

- Rotation : Nous obtenons une réponse quand le dispositif est tourné. La rotation du dispositif est possible uniquement s'il est fixé, le potentiomètre est un exemple significatif. Bien que le trackball est un dispositif effectuant des rotations il est utilisé pour réaliser des translations. L'utilisateur ne perçoit que de faibles rotations et il a l'impression de se déplacer sur une ligne droite, comme s'il s'agissait d'un dispositif en translation. Les dispositifs rotatifs sont assez intéressants car ils permettent d'effectuer selon la configuration, des translations et des rotations.

- *Translation* : le dispositif ne réagit que lorsqu'il est poussé. Il se déplace en ligne droite. Tous dispositifs 2D peut se comporter comme un dispositif rotationnel, rien ne l'empêche de se déplacer en cercle (la souris en est un exemple).

Niveau 5 :

- *Non-borné* : Le dispositif peut se déplacer sans aucune limite. Par exemple, un potentiomètre à vis sans fin. Uniquement les dispositifs en rotation peuvent être non-limité, un objet peut tourner sans fin autour de lui même. Des dispositifs bornés peuvent se comporter en tant que dispositifs non-bornés si on n'atteint jamais les limites du dispositif. Si nous prenons l'exemple de la tablette tactile, elle peut se

comporter comme un dispositif non limité si le plan de la tâche est inférieur a la surface de contact de la tablette. L'avantage des dispositifs non-bornée c'est leur capacité de se comporter comme des dispositifs bornés

- *Borné* : ces dispositifs ont leur déplacement limité physiquement. par exemple, un potentiomètre d'autoradio. Les dispositifs en translation sont toujours limités, ils percutent souvent des objets sur leurs chemins. C'est pour cela que le mouvement de la souris est borné. Mais, tout dispositif borné peut devenir non-borné en utilisant un embrayage, en soulevant le dispositif (par exemple pour la souris, on peut la soulever et la replacer), ou en utilisant un bouton qui désunis le dispositif de l'application. Les dispositifs bornés sont intéressant dans le cas ou leurs limites physiques correspondent aux limites de l'application, ce qui permet de mieux se situer dans l'environnement de la tâche.

Niveau 6 :

- *Homogène* : les dispositifs homogènes ne peuvent pas récupérer une position ultérieure même en s'aidant de la vision ou du toucher. Les dispositifs homogènes ne sont pas bornés, car une borne peut spécifier une position à laquelle l'utilisateur peut revenir. Un tel dispositif peut être intéressant dans le sens où il permet de simuler plusieurs dispositifs virtuels en même temps. On n'a pas de problème de l'initialisation au niveau de chaque dispositif virtuel que Buxton [Bux83] appelle le "*nulling problem*". Par exemple, si nous utilisons un seul interrupteur rectiligne physique pour manipuler plusieurs interrupteurs virtuels, à chaque passage d'un interrupteur virtuel à l'autre il faut initialiser la position physique du dispositif réel car les interrupteurs virtuels ne se trouvent pas toujours à des positions égales.

- *Position distincte* : Le dispositif reste à la dernière position à laquelle il a été initialisé. Les dispositifs bornées ont des positions distincts à leurs limites. Les dispositifs physiques non-bornés sont considérés comme des dispositifs à position distincte si leurs positions sont marquées. L'avantage d'un dispositif à position distinct par rapport à un dispositif homogène réside dans les situations où l'utilisateur peut revenir à la position où il a laissé le dispositif. Par exemple positionner des objets 3D à des orientations bien particulières et retrouver cette orientation par la suite. Un autre avantage réside dans le fait que certains dispositifs à position distincte peuvent être manipulés uniquement par le toucher ce qui permet à l'opérateur de concentrer sa vision sur l'application.

Niveau 7 :

- *Non-volatile* : Le dispositif garde sa position physique et la valeur de sortie qui lui correspond quand il est lâché, par exemple un potentiomètre rotationnel. Les dispositifs non-volatiles sont intéressant pour la correspondance entre les positions physiques du dispositif et les réponses de celui-ci.

- *Volatile* : Les dispositifs volatiles perdent leurs positions mécaniques ou leurs valeurs de sorties lorsqu'ils sont relâchés. Par exemple, les stylos optiques, les joypads et les joysticks à ressort de rappel. La contrainte des dispositifs volatiles est la non détermination du moment où le dispositif a été relâché (stylo de tablette tactile, joystick à ressort de rappel, ...). Il ne faut pas confondre ce genre de dispositif avec les dispositifs homogènes qui perdent la position virtuelle mais conservent la position physique, alors que les dispositifs volatiles perdent la position physique et la position virtuelle.

Niveau 8 :

- *Inertie* : Le dispositif se déplace sous l'effet de son inertie lorsqu'il est relâché. Ce qui peut entrainer le déplacement du dispositif sous l'effet de l'élan de l'utilisateur. Ces dispositifs sont intéressant pour les déplacement important suivit d'un petit déplacement.

- *Sans inertie* : Il s'agit des dispositifs à l'inverse des précédants s'arrêtant juste au moment ou ils sont relâchés, ou du moins le déplacement effectué n'influe pas sur l'application. Certains potentiomètres rectilignes possèdent cette propriété. Les dispositifs possédant un coefficient d'amortissement important se comportent de la même manière. Ces dispositifs sont intéressant dans les applications demandant de la précision et dans lesquelles l'utilisateur veut éviter les déplacements parasites du dispositif physique. Ceci est souvent le cas dans les applications de simulation utilisant du retour kinesthésique.

Niveau 9 :

A ce niveau du graphe, il y a une séparation entre les deux types de dispositifs décrit plus haut suivant leurs caractéristiques. Dans la première catégorie de dispositifs (fixe), nous trouvons les dispositifs : à mémorisation de la position, à ressort de rappel, isométrique. Dans la seconde catégorie (mobiles) nous trouvons : dispositif saisissable ou à fixations sur le corps (comme les gants de données, les exosquelettes)

- *Mémoire de la position (remain-in-position)* : le dispositif conserve la position que nous lui affectons lorsqu'il est relâché. Ces dispositifs sont aussi non-volatiles car la position où on l'a lâchés reste la même. Ces dispositifs peuvent être avec ou sans inertie. Les dispositifs que nous allons voir par la suite, dispositifs à ressort de rappel et dispositifs isométrique ont aussi de l'inertie mais elle n'influe pas sur leur comportement de la même manière que sur les dispositifs à mémorisation de la position.

- *Ressort de rappel (spring-return)* : les dispositifs à ressort de rappel sont des dispositifs qui reviennent à leurs positions initiales lorsqu'ils sont relâchés et dont la valeur de sortie est perdue ; ce sont donc des dispositifs volatiles. Le déplacement de ces dispositifs est limité par l'extension maximale du ressort de rappel.

- *Isométriques (isométric)* : il s'agit des dispositifs fixes et dont les sorties dépendent de la force appliquée sur le dispositif. Ces dispositifs sont aussi volatiles car la force disparaît lorsque le dispositif est relâché. Si le dispositif est bien fixé, c'est un dispositif orthogonal. Mais il pourra être considère comme *dispositif contraint* s'il y a des rotations parasites. Un dispositif isométrique de translation est poussé, un dispositif en rotation est tordu. Ils ont une position distincte à l'endroit physique de leurs fixations.

- *Dispositif saisissable (Held-up)* : ce sont des dispositifs qui tombent par terre lorsqu'ils sont relâchés. Ce sont des dispositifs volatiles. Le stylo de la tablette tactile, et les capteurs magnétiques saisis par la main lors des déplacements dans des environnements virtuels sont des exemples de tels dispositifs.

- *Dispositif à fixation sur le corps (Body-Mounted)* : ce sont tous les dispositifs attachés au corps, fixation sur les doigts, la main, le bras, tête, ... dans le but de capturer les mouvements du corps. Ces dispositifs ont des positions distinctes, le corps peut revenir à un état ultérieur. Les dispositifs montés sur le corps sont non-volatiles car ils ne peuvent pas être relâchés. Un exemple de tels dispositifs est le gant développé par Exos [Pat90] : ce dispositif possède des capteurs d'angles montés sur les doigts et un capteur de position pour capturer le déplacement de la main (un capteur Polhemus [Kri91]). Les dispositifs capturant la position de l'utilisateur à distance sans que l'utilisateur porte quoique ce soit tel que la capture par caméra [Kru92] sont similaires aux dispositifs à fixations sur le corps. Par contre les capteurs de forces montés sur le corps sont des dispositifs volatiles car bien qu'ils soient fixés au corps, ils ne captent aucune force s'ils ne sont pas sollicités.

Niveau 10

- *Capteur de position* : le dispositif capte une position ou une orientation : la plupart des joysticks et tablettes tactiles.

- *Capteur de déplacement* : ces dispositifs capturent la distance parcourue à partir des dernières positions ou orientations. Ces capteurs n'ont pas de renseignement sur les positions absolues, c'est ce qui différencie la souris et la tablette tactile bien qu'ils soient deux dispositifs à 2 DDL. La capture du déplacement est équivalente à la capture de vitesse, puisque le changement de position se fait à travers le temps.

- *Capteur de force* : ils récupère la force appliquée sur le dispositif. Les dispositifs isométriques ne capturent que des forces, parce qu'ils sont fixes.

Annexe C

CORDIS-ANIMA

Dans ce qui suit, nous allons présenter les principes du formalisme Cordis-Anima pour la modélisation et la simulation des objets. A cet effet, nous allons présenter les algorithmes utilisés pour simuler les objets de l'univers physique. Ce qui suit est un résumé de [Cad93]. Tous les modèles présenter dans ce travail ont été réalisés grâce à ce système.

1. Axiomes de base de Cordis-Anima

1.1. Modularité et expérimentabilité des modèles

Les choix fondamentaux attachés au formalisme Cordis-Anima sont ceux de la modularité des modèles et de l'expérimentabilité de chacun des modules.

Modularité
Tout objet Cordis-Anima est constitué d'un certain nombre de sous-objets agencés selon une certaine structure. Les propriétés de l'objet global sont alors complètement déterminées par

les propriétés intrinsèques de chacun de ses composants, ainsi que par la structure et la nature des communications mécaniques établies entre ceux-ci. Cette modularité est la garantie d'une certaine généricité de la représentation et de la possibilité de construire une grande variété d'objets à partir d'un nombre restreint de composants élémentaires.

Expérimentabilté
Les modules, ou composants, à partir desquels est réalisé un objet Cordis-Anima sont de même nature que l'objet constitué. Chacun de ces modules doit pouvoir, comme l'objet lui-même, être mis en relation sensori-motrice avec un éventuel opérateur. Tous les éléments auxquels l'utilisateur a affaire avec Cordis-Anima ont une réalité mécanique expérimentable, et la première connaissance que celui-ci possède, mis à part toutes représentations formelles, est perceptuelle.

1.2. Point de communications

Toute simulation utilisant des transducteurs conduit au choix d'une représentation des interactions physiques entre objets sous forme d'une communication mécanique ponctuelle. La séparation entre capteurs et effecteurs va faire que cette communication sera orientée : tout contact bilatéral devra être établi à travers une paire d'entrée et de sortie complémentaires et indissociables. Une conséquence immédiate de ceci est d'abord la séparation des variables duales intensive et extensive, Force et Position (ou vitesse), puis leurs affectations respectives à l'un et à l'autre des éléments de cette paire.

Nous nous trouvons donc en présence de deux types de paires d'entrée/sortie que nous appellerons points de communication. Les points de communication prenant la variable intensive en entrée et la variable extensive en sortie seront notés 'M', ceux pour lesquels c'est l'inverse seront notés 'L' *(figure C.1)*.

***Figure C.1** : Communications ponctuelles et orientées - Points 'M' et 'L'*

La connexion des points M et des points L se fait suivant certaines règles :

1- Il est interdit de connecter deux points M entre eux ou deux points L entre eux.

2- On peut connecter plusieurs points L à un seul point M. Mais à un point L on ne peut connecter qu'un seul point M.

3- Dans le cas de plusieurs points L connectés à un seul point M l'entrée du point M est la somme des variables intensives produits par les points L, et l'entrée de tous les points L est l'unique sortie extensive du point M.

1.3. Les Atomes de Cordis-Anima

Les atomes sont les éléments indivisibles et grâce auxquels il est possible d'obtenir les autres objets. Il va donc falloir construire des atomes plus complexes en assemblant les points de communications. Une rapide investigation permet d'établir que les atomes les plus simples aboutissant à un système générique sont les deux suivants *(figure C.2.a)* :

- L'atome <MAT> constitué d'un point de communication de type 'M'. Il sera associé à un algorithme qui calcule en sortie une position X au cours du temps, à partir de la résultante des forces F appliquées en entrée par l'environnement. Il représente donc une localisation ponctuelle dans l'espace. Cet atome est l'élément minimal de matière, nous l'appellerons *'point matériel'*.

- L'atome <LIA> constitué de deux points de type 'L' soudés entre eux. Il permet de connecter deux points matériels, et sera associé à un algorithme qui calcule deux forces en sortie à partir de ce qu'il connaît des deux points connectés : leurs positions et leurs vitesses (ou déplacement ∂X). Cet atome représente une liaison mécanique entre deux points matériels, nous l'appellerons 'élément de liaison'. La cohérence physique globale nous dicte dès maintenant le respect de la loi fondamentale en mécanique de l'action et de la réaction. Ainsi devons nous garantir que les forces calculées par les éléments de liaison seront égales en module et de sens opposés.

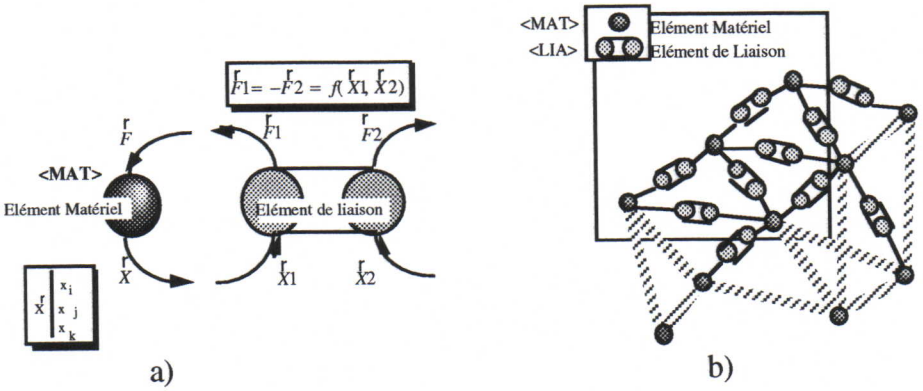


***Figure C.2** : a) Règles de connexion des points de communication*
b) Réseau de composants discrets interconnectés

Tout simulacre construit à l'aide du formalisme Cordis-Anima sera donc formé d'un ensemble d'éléments de liaison et de points matériels interconnectés. Nous adopterons souvent une représentation sous forme d'un réseau, dont les noeuds sont occupés par les points matériels et dont les arcs représentent les éléments de liaison *(figure C.2.b)*.

On remarque à l'issue de cet exposé que c'est en poussant à l'extrême la contrainte sur la 'ponctualisation' des communications, laquelle est inhérente au support technologique, que l'on est amené à remonter jusqu'à la physique de Newton en optant pour la dynamique des systèmes de particules. Dans ce système de représentation, la matière comme le temps sont discrétisés et localisés en des points. Il nous faudra jouer avec le pas de discrétisation spatiale et temporelle, afin de laisser nos sens croire au continu face à cette représentation discrète.

2. Les Module de changement de point de vue relatif

Les Module de changement de point de vue relatif représentent une catégorie de modules qui ne manipulent pas exclusivement des variables physiques, ne répondent pas nécessairement à un modèle physique immédiat. Ces modules utilisés avec des règles précises aux côtés des modules physiques vont réaliser rationnellement certains "raccourcis" et permettre d'étendre considérablement les possibilités de représentation [Cad93].

Extérieurement, le MPVR ne se distingue pas des modules physiques dans la mesure où il ne présente que des points de communication de type M où L. Il n'est cependant pas un module physique car il ne simule le comportement d'aucun objet physique matériel ou identifiable. Il s'interpose entre deux sous-objets préalablement définis (l'un des deux pouvant représenter l'utilisateur) et il convertit un certain nombre de points M (respectivement L) en un certain nombre de points L (resp. M). L'exemple le plus simple est celui où, rompant une connexion entre un point M et un point L, on introduit à la ,sortie du premier un facteur multiplicatif "p" (ou un facteur multiplicatif "1/p" à son entrée, ce qui revient au même. Dans ce cas, au travers de ce point de connexion, les objets se voient mutuellement selon une taille relative différente.

Un cas plus complexe peut correspondre à un changement de variable, permettant d'appliquer par exemple une logique physique facilement concevable dans un repère cartésien à un repère en coordonnées polaires. Dans ce cas, le nombre de points d'un côté et de l'autre du MPVR est le même.

2.1. Quelques modèles de modules MPVR

2.1.1. Modèle 1

Dans le système qui suit nous allons décrire un MPVR où le nombre de points d'entrée et de sortie est le même (pour chaque entrée correspond une et une seule sortie).

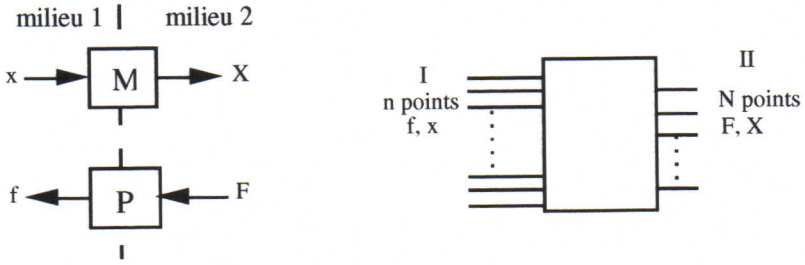


Figure C.3: *transfert des données entres deux environnements*

Soient x et X deux déplacements respectivement dans le milieu 1 et le milieu 2,
Soient f et F les forces de réaction respectivement dans le milieu 1 et le milieu 2,
Si nous notons, M et P les matrices carrées de passage *(figure C.3)*.
On obtient les équations suivantes :

$$X = M.x \quad \text{(Eq. C.1.)}$$

$$f \quad = \quad P.F \qquad \text{(Eq. C.2.)}$$

avec

$$M = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{21} & . & . & m_{m1} \\ m_{12} & m_{22} & & & \\ . & & & & \\ . & & & & \\ m_{1n} & & & & m_{mn} \end{pmatrix} \qquad P = \begin{pmatrix} p_{11} & p_{21} & . & . & p_{m1} \\ p_{12} & p_{22} & & & \\ . & & & & \\ . & & & & \\ p_{1n} & & & & p_{mn} \end{pmatrix}$$

Dans un système où il y a conservation de l'énergie, pour tout déplacement dx dans le milieu 1, et pour toute force F de réaction dans le milieu 2, on a :

$$dW = {}^tF.dX = {}^tf.dx \qquad \text{(Eq. C.3.)}$$

avec

$$dx = \begin{pmatrix} dx_1 \\ . \\ . \\ . \\ dx_n \end{pmatrix} \qquad dX = \begin{pmatrix} dX_1 \\ . \\ . \\ . \\ dX_n \end{pmatrix}$$

l'égalité (Eq. C.3) est vraie pour tout déplacement dx et pour toute force de réaction F.
On peut alors démontrer en remplaçant (Eq. C.1.) et (Eq. C.2.) dans (Eq. C.3.) la relation entre les deux matrices de transfert :

$$P \quad = \quad {}^tM \qquad \text{(Eq. C.4.)}$$

De l'équation (Eq. C.4), nous pouvons déterminer la relation entre les forces développées par le modèle et la sortie force vers l'utilisateur, si nous avons la relation entre les positions captées au niveau de l'utilisateur est celle réellement injecté dans la simulation.

2.1.2. Modèle 2

Dans cette section nous décrivons un type particulier de module MPVR *(figure C.4.a)* où le déplacement rectiligne de l'utilisateur est transformé en un déplacement circulaire dans la simulation *(figure C.4.b)*.

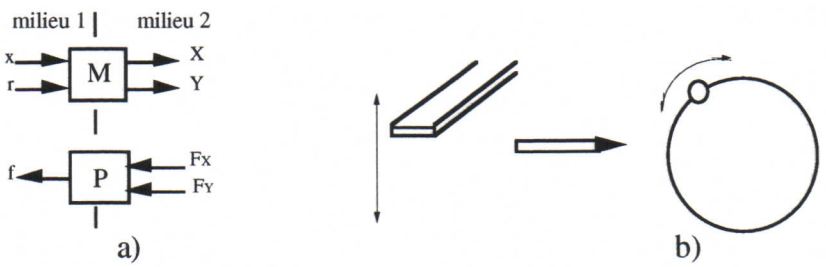


Figure C.4: *transfert des données entres le milieu1 et le milieu 2 : Transformation d'un déplacement linéaire en déplacement rotatif.*

Soit le point $\overset{r}{M}\begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix}$ représentant les coordonnées de l'objet se déplaçant dans le milieu 2.

nous avons $\begin{cases} X = r.\cos(x) \\ Y = r.\sin(x) \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} dX = -r.\sin(x).dx + \cos(x).dr \\ dY = r.\cos(x).dx + \sin(x).dr \end{cases}$

de la relation ($f.dx = d\overset{\perp}{M}.\overset{\perp}{F}$) nous obtenons :

$$dW = f_x.dx + f_r.dr = (-r.\sin(x).dx + \cos(x).dr).F_x + (r.\cos(x).dx + \sin(x).dr).F_y$$

d'où la force en sortie $\begin{cases} f_x = -r.\sin(x).F_x + r.\cos(x).F_y \\ f_r = \cos(x).F_x + \sin(x).F_y \end{cases}$.

Le module décrit dans la *figure C.5* est constitué d'une composante tangentielle et d'une composante normale.

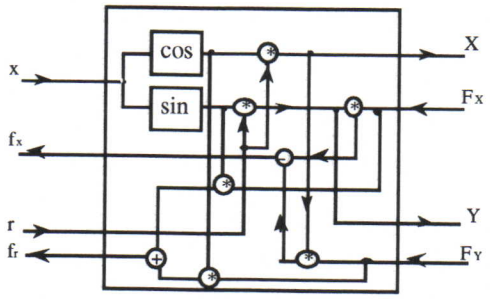


Figure C.5 : *Module MPVR de transformation polaire*

Nous avons utilisé une version dégénérée de ce module *(figure C.6)* dans notre compagne d'expérimentation *(§Chapitre 8)* où nous nous intéressons uniquement à la composante tangentielle (le rayon de la trajectoire circulaire est fixe).

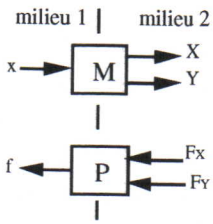


Figure C.6: *transfert des données entres le milieu 1 et le milieu 2*

Les équations caractérisant ce modèle sont les suivantes :

$$\begin{cases} X = r.\cos(x) \\ Y = r.\sin(x) \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} dX = -r.\sin(x).dx \\ dY = r.\cos(x).dx \end{cases}$$

avec $f.dx = (-r.F_x.\sin(x) + r.F_y.\cos(x)).dx$

$$= -Y.F_x + X.F_y$$

d'où la force en sortie: $f = r.F_y.\cos(x) - r.F_x.\sin(x)$

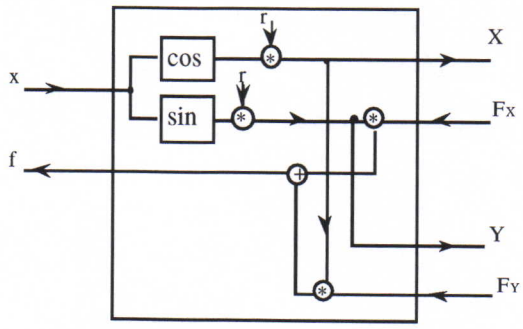


Figure C.7: *Module MPVR pour une rotation à rayon contant*

3. Les algorithmes de simulation

Après avoir décrit la forme générale du langage de représentation d'objets physiques déformables qu'est Cordis-Anima, nous allons nous intéresser au contenu algorithmique des modules physiques et à la réalité des systèmes dynamiques que l'on veut représenter, en associant à chaque module un objet physique réel de référence.

Dans l'espace d'état (position, vitesse ou force), un système mécanique composé d'un nombre fini de points matériels est représenté par l'ensemble des positions et des vitesses de ces points. Chaque point matériel, ou masse ponctuelle apparaît comme un système dynamique élémentaire auquel sont associées les variables d'états positions et vitesses définies dans l'espace tridimensionnel euclidien. Ce système dynamique peut être considéré comme un dipôle d'entrée/sortie force/position dont la loi d'évolution est régie par la loi fondamentale de la dynamique :

$$\vec{F} = m.\vec{\Gamma} = m.\frac{d^2X}{dt^2}$$

Par analogie, dans Cordis-Anima , le simulacre d'un système mécanique est construit par l'association d'un nombre fini de points matériels représentant la concentration de la matière inerte du système, ces points matériels étant liés entre eux par des éléments de liaison faisant figure de liens mécaniques idéalisés, sans masse ni inertie. Compte tenu de ce choix, les trois éléments de base de représentation de la matière du modeleur/simulateur Cordis-Anima sont le point matériel, le ressort et la viscosité. Le ressort correspond au calcul d'une force élastique :

$$F = -k.\Delta X$$

Alors que la viscosité correspond au calcul d'une force visqueuse :

$$F = -z.\Delta V$$

Ces deux derniers éléments sont souvent présentés comme une seule liaison viscoélastique contenant une élasticité et une viscosité, et constituent la base de CORDIS-ANIMA.

$$F = -k.\Delta X - z.\Delta V$$

Après avoir défini les trois éléments de base de la représentation de la matière dans Cordis-Anima, il nous reste à mettre en oeuvre les algorithmes qui permettent l'établissement d'un isomorphisme entre les comportements dynamiques des systèmes mécaniques de références et de leurs simulacres. Ceci revient à construire une expression numérique explicite des équations caractéristiques de chaque élément mécanique de référence : le point matériel, l'élasticité et la viscosité. Pour cela, il faudra appliquer un schéma de discrétisation temporelle permettant une approximation numérique des opérateurs de dérivation.

Les schémas de discrétisations utilisés par le système Cordis-Anima sont basé sur le schéma d'Euler.

Pour toute fonction *f(t)* continue et dérivable, et pour une période d'échantillonnage T_e nous aurons :

$$f_n = f(n.T_e) \Rightarrow \frac{df(n.Te)}{dt} = \frac{f_n - f_{n-1}}{T_e} \text{ et } \frac{d^2f(n.Te)}{dt^2} = \frac{f_{n+1} - 2.f_n + f_{n-1}}{T_e^2} \text{ (schéma centré)}$$

Appliquée à la vitesse, nous aurons :

$$V_n = \frac{X_n - X_{n-1}}{T_e}$$

Pour l'accélération :

$$\Gamma_n = \frac{X_{n+1} - 2X_n + X_{n-1}}{T_e^2}$$

En ramenant ces expressions à l'expression de la loi fondamentale de la dynamique (Eq. 1.1), celle-ci sera approchée par l'expression discrète suivante :

$$\vec{F}_n = \frac{m}{Te^2}.(\vec{X}_{n+1} - 2.\vec{X}_n + \vec{X}_{n-1})$$

Ce qui permet d'avoir l'équation récurrente pour l'algorithme du point matériel :

$$\vec{X}_{n+1} = 2.\vec{X}_n - \vec{X}_{n-1} + \frac{Te^2}{m}.\vec{F}_n$$

Compte tenu de l'expression approchée de la vitesse, et en notant $\Delta X = \left\|\vec{X}_1 - \vec{X}_2\right\|$ la distance entre deux points aux extrémités d'un élément de liaison, et ΔX_{n-1} la distance au pas précédent, et $\vec{u} = \frac{1}{D}.(\vec{X}_1 - \vec{X}_2)$ le vecteur unitaire du bipoint et L_0 la longueur au repos du ressort, alors les expressions numériques de la liaison visqueuse et de la liaison élastique seront respectivement :

$$\vec{F}_{1n} = -\vec{F}_{2n} = -\frac{Z}{Te}.(\Delta X_n - \Delta X_{n-1}).\vec{u}$$

$$F_n = -k.(\Delta X_n - L_0)$$

Et finalement pour l'algorithme de l'élément de liaison viscoélastique :

$$\vec{F}_{1n} = -\vec{F}_{2n} = -\{k.(\Delta X_n - L_0) + \frac{z}{Te}.(\Delta X_n - \Delta X_{n-1})\}.\vec{u}$$

Dans notre travail nous rencontrerons ce que nous appelons les paramètres physiques et les paramètres algorithmiques. Ces deux termes se rattachent aux deux espaces de paramètres que nous aurons à manipuler en permanence, c'est à dire l'espace physique réel continu pour les paramètres physiques et l'environnement virtuel discret pour les paramètres algorithmiques. Ils se déduisent simplement l'un de l'autre, et correspondent respectivement au point de vue du modèle (objet réel) et à celui de la simulation (objet virtuel). Les paramètres physiques : m (masse), k (paramètre de raideur), z (paramètre de viscosité) doivent être considérés en référence à l'objet matériel que l'on veut modéliser. Les paramètres des expressions algorithmiques associés à chaque module physique ne leur sont pas systématiquement égaux ; on parlera pour ces derniers de paramètres algorithmiques.

D'une manière générale les paramètres z de viscosité intervenant dans le calcul d'une force comme un coefficient multiplicateur d'une vitesse, se verront correspondre des paramètres 'Z' de viscosité algorithmique tels que : $Z = \frac{z}{Te}$

Au paramètre k de raideur va correspondre un paramètre K de raideur algorithmique : $K=k$

Au paramètre m de la masse va correspondre un paramètre M algorithmique : $M = \frac{m}{T^2}$

4. Les aspects non-linéaires

Le point matériel et l'élément de liaison ne permettent pas la réalisation d'interactions non-linéaires. En effet, ces deux éléments constituent un substrat matériel linéaire et ne permettent pas de représenter des comportements discontinus visibles, par exemple dans des situations de chocs entre objets. Pour remédier à ceci, on a introduit la notion de liaison conditionnelle permettant la représentation de situations d'interaction non-linéaires.

Pour la réalisation de ces fonctions non-linéaires nous avons choisi pour des raisons d'économie de calcul, une méthode de calcul directe faisant intervenir l'opérateur 'valeur absolue'.

Toute fonction linéaire par morceaux continus (sans pente infinie) peut se calculer de manière exacte par une expression du type :

$$f(E) = a_0 * E + \sum_{i=1}^{n} a_i * |E - E_i| + K$$

Si on note p_k la pente de la courbe sur l'intervalle $[E_k;E_{k+1}]$ (avec $E_0=-\infty$ et $E_{n+1}=+\infty$), on a :

$$p_0 = a_0 - \sum_{i=1}^{n} a_i, \quad p_k = a_0 - \sum_{i=1}^{n} a_i - \sum_{i=k+1}^{n} a_i, \quad p_n = a_0 - \sum_{i=1}^{n} a_i$$

On remarquera que dans le cas particulier où $p_0=p_n$, $a_0=0$, $f(E) = \sum_{i=1}^{n} a_i * |E - E_i| + K$.

Inversement, les a_i se calculent à partir des valeurs des différentes pentes p_i par la formule :

$$a_i = \frac{p_i - p_{i-1}}{2} \quad \forall i = 1 \ldots n \text{ et } a_0 = P_0 + \sum_{i=1}^{n} a_i$$

d'autre part la constante K se calcule à partir de n'importe quel couple de valeur $\{E,f(E)\}$, par exemple $K = f(0) - \sum_{i=1}^{n} a_i * |E_i|$.

Cette solution ne permet pas de représenter de manière exacte les caractéristiques avec pente infinie.

A titre d'illustration de type de lien non-linéaire entre objets simulés nous présentons la liaison d'interaction de non-pénétration entre deux objets simulés à la *figure C.8*

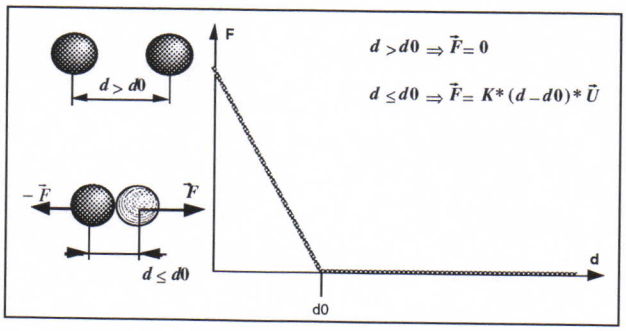


Figure C.8 *: Loi d'interaction : exemple de non-pénétration*

Dans l'univers simulé par Cordis-Anima les interactions entre les objets sont représentées par des lois d'interactions non-linéaires dont la plus simple est la loi de non-pénétration, dite aussi de collision, entre deux points matériels ou deux groupes de points matériels. Cette loi de collision peut être interprétée comme l'introduction d'un ressort entre les deux ensembles de points matériels lorsqu'ils sont suffisamment proches.

Bibliographie

[Bah55] H.P. Bahrick, P.M. Fitts, and R. Schneider, "Reproduction of Simple Movements as a Function of Factors Influencing Proprioceptive Feedback", Journal of Experimental Psychology, 1955, Vol. 49, No. 6, pp. 445-456.

[Bar91] D. Barac-Cikoja, and M.T. Turvey, "Perceiving aperture size by Striking,", Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance, 1991, Vol. 17, No. 2, pp. 330-346.

[Bar92] M. Bares, F.Néel, D.Teil, J.C.Martin, " Organisation d'une demande conceptuelle pour modéliser l'interaction homme-machine: application au copilote électronique", Colloque "Interface des mondes réels et virtuelles", Montpellier, Mars 1992.

[Bau93] T. Baudel, M.Beaudoin-Lafon "Charade: Remote control of objects using Free-Hand Gestures", Communications of ACM, Juillet 1993, pp. 28-35.

[Bea83] D. Beaubaton, "Contrôles proactif et rétroactif de la motricité : röle des gonglions de la base et du cervelet dans la programmation et l'execution du mouvment", Thèse de doctorat, Faculté des sciences Aix-Marseille II, 1983.

[Bea95] G.L. Beauregard, M.A. Srinivasan, N.I. Durlach, "The manual resolution of viscosity and mass", ASME International Mechanical Engineering Conference and Exposition (IMECE), Fourth Annual symposium on Haptic Interface and Teleoperators, San Francisco 1995.

[Bou83] A. Bouvier, M. George, "Dictionnaire des Mathématiques", Presses Universitaires de France, 1983, 2éme édition, Isbn 2 13 0372724.

[Bou94] A.Bouzouita, "La Réalité Virtuelle : Etat de l'Art", Rapport interne ACROE, Mars 94.

[Bou95] A.Bouzouita, C.Cadoz, "Interaction Instrumentale Multisensorielle : éléments pour l'étude des transformations entre l'espace de l'opérateur et l'espace de la tâche", IHM'95, Toulouse, France, pp. 107-114.

[Bou96] A.Bouzouita, C.Uhl, A.Luciani, C.Cadoz, "Manipulation complexe d'objets Virtuels", Interface des Mondes Réels et Virtuels, Montpellier 1996, pp. 459-470.

[Bri94] Y.Briere, "Téléopération en présence de retard: Le concept de téléopération hybride duale", Thèse de l'ENSAE, Toulouse, Janvier 1994.

[Bro90] F.P.Brooks, M.Ouh-Young, J.J.Batter, P.J.Kilpatrick, "Project GROPE: haptic display for scientific visualisation", Computer Graphics, août 1990.

[Bur93] G.Burdea, P.Coiffet, "La Réalité Virtuelle", Edition HERMES, Décembre 1993.

[Bus82] P. Buser, M. Imbert, "Psycho-physiologie sensorielle : neurophysiologie fonctionnelle II", Ed. Hermann, Coll. Méthodes, 1982.

[But95] P. Buttolo, B. Hannaford, "Pen-Based Force Display for Precision Manipulation in virtual Environments", Proceedings IEEE Virtual Reality Annual International Symposium, North Carolina, March 1995, pp. 217-224.

[Bux83] W. Buxton, "Lexical and Pragmatic Consideration of Input Structures", Computer Graphics, 1983, pp. 31-37.

[Bux95] W. Buxton, "Touch, Gesture and Marking", Reading in human Computer Interaction : toward the year 2000, Second Edition, R.M. Baeker, J. Grudin, W. Buxton, S. Greenberg, Ed. Morgan Kaufmann Publishers, 1995.

[Cad84a] C. Cadoz, "Le Geste et l'Ordinateur ", rencontre CNRS *Le Dialogue Homme-Machine*, Paris, Juin 1986.

[Cad84b] C. Cadoz, A. Luciani, & J.L. Florens , " Gesture, Instrument and Musical Creation. The Anima/Cordis system", Preprint n°2086, 75th AES Convention, Paris 1984.

[Cad93] C. Cadoz, A. Luciani and J.L. Florens "CORDIS-ANIMA : a Modeling and Simulation System for Sound and Image Synthesis- The General Formalism", Computer Music Journal, Vol 17-1 spring 1993, MIT Press

[Cad94a] C. Cadoz, "Les réalités virtuelles", Coll. Dominos, Ed. Flammrion, 1994.

[Cad94b] C.Cadoz, "Le geste canal de communication Homme-Machine", Technique et science informatique, Volume 13, n°1,1994.

[Cae92] J. Caelen, J. Coutaz, "Interaction Homme-Machine Multimodale : quelques problèmes ", Bulletin de la communication Parlée, n°2, 1992, pp. 125-140.

[Cha91] T.C. Chan, and M.T. Turvey, M.T., "Perceiving the Vertical Distance of Surfaces by Means of a Hand-Held Probe," Journal of Experimental Psychology, 1991, Vol. 17, No. 2, pp. 347-358.

[Cha92] S. Chatty, "Interface Homme-Machine animée", Thèse de doctorat Paris XI, Orsay, 1992.

[Cha95] S. Chatty, P. Lecoanet, " Un poste de travail avec reconnaissance de gestes pour le contrôle aérien", IHM'95, Toulouse, France.

[Coi92] P. Coiffet, "La Robotique : principes et applications", 3éme Ed., Ed. Hemes, 1992, isbn 0981-7824.

[Col88] J.E. Colgate, and N.Hogan, "Robust Control of Dynamically Interacting Systems", Int. J. Control, Vol. 48, No.1, pp. 65-88 (1988).

[Col94] J.E. Colgate, and G. Schenkel, " Passivity of A class of Sampled-Data systems : Application to haptic interfaces", American Control Conference, Baltimore, 1994.

[Cor70] T.N. Cornsweet, "Visual Perception", Ed. Academic Press Inc., New York, isbn 0-12-189750-8, 1970.

[Cro83] E.R.Crossman, and P.J. Goodeve, "Feedback control of Hand-movement and Fitts' Law," Quarterly Journal of Experimantal Psychology, 1983, Vol. 35A, pp. 251-278.

[Edw95] W.K. Edwards, E.D. Myatt, K. Stockon, "Access to raphical interfaces for blind users", Interactions, Janvier 1995, pp. 54-67.

[Ex96] Exos, http://www.exos.com/

[Fam90] J.P. Famose, "Apprentissage Moteur et difficulté de la tâche", Coll. Recherche, INSEP Publications, 1990.

[Fei93] S.Feiner, B.Macintyre, D.Seligmann, "Knowledge-ased Augmented Reality", Communication of The ACM, Vol. 36, n°. 7, Juillet 1993.

[Fit54] P.M. Fitts, "The Information Capacity of the Human Motor System in Controlling the Amplitude of Movement" , Journal of Experimantal Psychology, 1954, Vol. 47, No. 6, pp. 381-391.

[Flo78] J.L. Florens, "Coupleur gestuel rétroactif pour la commande et le contrôle de son de synthèses", Thèse de 3ème cycle, INPG, Grenoble 1978.

[Flo90] J.L. Florens, "autour de la simulation instrumentale modulaire et du contrôle gestuel. Quelques problèmes théoriques et d'implantation", Colloque International Modèle Physique, création musicale et ordinateur, Grenoble 1990, pp. 403-440.

[Fol87] J. Foley, "Les communications entre l'Homme et l'ordinateur", Pour la Science, Décembre 1987.

[Fol90] J. Foley, A. van Dam, S. Feiner, J. Hugues, "Computer Graphics, Principles and Practice", Ed. Addison-Wesley, 1990.

[Fra74] P. Fraisse, "Manuel pratique de psychologie expérimentale", Presse Universitaires de France, 1974.

[Fro91] D. Frohlich, "The Design Space of interfaces", First Eurographics Workshop in Multimedia Systems, Interaction and Applications", Stockolhm, Sweden, 1991, pp. 53-69.

[Ges85] G. A. Gescheider, "Psychophysics : Method, Theory and Application", 2nd Edition, Lawrence Erlbaum Associates, Hillsdale, New Jersey.

[Gib62] JJ.. Gibson, "Observation on active Touch", Psychological Review, Vol. 69, 1962, pp. 477-491.

[Gil92] B. Gillespie & M. Cutkosky, " Interactive Dynamics With Haptic Display", in Proceedings of the winter annual Meeting of the ASME, Vol. 49, pp. 65-72, New Orleans, LA.

[Hab97] A. Habibi, "Visualisation d'objets trés déformables", Thèse de doctorat INPG, Janvier 1997.

[Han88] B. Hannaford, R. Anderson, " Experimental and simulation studies of hard contact in force reflecting teleoperation", Proc. IEEE Conference on Robotics and Automation, pp 584-589, April 1988.

[Han95] B. Hannaford, S. Venema, " Kinesthetic Displays for Remote and Virtual Environments", In "Virtual Environments and Advanced Interface Design", W. Barfield and T. Furness, Ed., Oxford, 1995.

[Hat81] Y. Hatwell, " Toucher L'espace : la main et la perception tactile de l'espace", Ed. Presses Universitaires de Lille, 1986.

[Hay94] V. Hayward, J.Choksi, G.Lanvin, C.Ramstein, " Design and multi-objective optimization of a linkage for haptic interface", proceeding of the 4th workshop on advances in robot kinematics, ark'94, 1994.

[Hic92] P. Hickin, "Anamorphosis", The Mathematical Gazette, Vol. 76, No. 476, July 1992, pp. 209-221.

[Hir95] K. Hirota, M.Hirose, "Providing Force Feedback in Virtual Environments", IEEE Computer Graphics and Applications, September 1995, pp. 22-30.

[Hou79] J.C. Houk, "Regulation of stifness by skeletmotor reflexes", Annual Review of physiology, n°41, 1979, pp. 99-114.

[Hun93] I.W. Hunter, T.D. Doukoglou, S.R. Lafontaine, P.G. Charette, L.A. Jones, M.A. Sagar, G.D. Mallinson & P.J. Hunter, "A Teleoperated Microsurgical Robot and Associated Virtual Environment for Eye Surgery", Presence, Vol. 2, No. 4, 1993, pp. 265-280.

[Iwa90] H. Iwata, "Artificial Reality with Force-Feedback: Development of Desktop Virtual Space with Compact Master Manipulator", Computer graphics, Août 1990.

[IT96] Immerssion Technlogie, http://www.immersion.com/ ?

[Jim93] S. Jimenez, " Modélisation et simulation physique d'objets volumiques déformable", Thèse doctorat, INPG, Grenoble, 1993.

[Jon90] L.A. Jones, and I.W. Hunter, "Influence of the Mechanical Properties of a Manipulandum on Human Operator Dynamics : I. Elastic Stifness, " Biological Cybernetics, 1990, Vol. 62, pp. 299-307.

[Jon93] L.A. Jones, I.W. Hunter, " Influence of the mechanical properties of a manipulandum on human operator dynamics : II. Viscosity," Experimental Brain Research, 1993, Vol. 69, pp. 295-303.

[Kap80] A. Kapandji, "Physiologie articulaire : schémas commentés de mécanique humaine", Ed. Librairie Maloine, 1980.

[Kla85] R.L. Klatzky, S.J. Lederman, V. Metzger, "Identifying objects by touch: An expert system", Perception & Psychophysics, 1985, 37(4), 299-302.

[Kla89] R.L. Klatzky, S. Lederman, C. Reed, "Haptic integration of object properties: Texture, hardness, and planar contour.Journal of Experimental Psychology : Human Perception & Performance, 1989, 15(1), 45-57.

[Kon95] D.A. Kontarinis, and R.D. Howe, "Tactile Display of Vibratory Information in Teleoperation and Virtual Environments," Presence, Vol. 4, N°4, 1995, pp. 387-402.

[Kre79] J.G. Kreifeldt, M.C. Chuand, "Moment of Inertia : Psychophysical Study of an Overlooked Sensation," Science, 1979, Vol. 206, pp. 588-590.

[Kru91] M. Krueger, "Artificial Reality II", Ed. Addison Wesley, 1991.

[Lar96] Dictionnaire Petit Larousse illustrées, Ed. 1996.

[Led90] S. Lederman, R. Klatzky, C. Chataway, C. Summers, "Visual mediation and the haptic recognition of two-dimensional pictures of common objects", Perception & Psychophysics, 1990, 47(1), 54-64.

[Lep84] J. Leplat, X. Cuny, "Introduction à la psychologie du travail", Presse Universitaire de France, 1984.

[Lib93] J. Lipscomb, M. Pique, "Analog input device physical caractéristics", SIGCHI Bulletin, 1993, n°25, pp. 40-45.

[Lin80] P. H. Lindsay, D.A. Normann, "Traitement de l'information et comportement humain : introduction à la psychologie", Ed. Etudes Vivantes, Montréal, Canada, 1980.

[Lis89] L. Lisowsky, C. Cadoz "Conception, Optimization and realisation of extra flat DC linear motors", 4th IEE int. Conf. on Electrical Machines and Drives, September 1989.

[Luc85] A. Luciani, "Un outil informatique d'images animées-modèles d'objets, langages, contrôle gestuel en temps réel", Thèse de Doctorat Electronique, INP Grenobe, 1985.

[Mac90] J. Mackinlay, S. Card, G. Roberton, "A Semantic Analysis of the Design Sapce of Input Devices", Human Computer Interaction, 1990, pp. 145-190.

[Maz93] J.P. Mazeau, X. Bryche, C. Delaplace, "Une machine permettant de traiter des expérience de réalité artificielle sans fil, des applications dans le domaine de la communication gestuelle a distance", Actes "L'intérface des mondes réels et virtuels", Montpellier, Mars 1993.

[Mer95] J.P. Merlet, "Designing a parallele manipulator for a specific workspace", rapport de recherche INRIA, RR2527, Avril 1995.

[Mey90] D.E. Meyer, J.E.K. Smith, S. Kornblum, R.A. Abrams, C.E. Wright, "Speed-Accuracy Tradeoffs in Aimed Movements: Toward a Theory of Rapid Voluntary Action," in Attention and Performance Xiii, M. Jeannerod, ed., Lawrence Erlbaum Associates, 1990.

[Mes97] P. Meseure, "Modélisation de corps déformables pour la simulation d'actes chirurgicaux", Thèse Université des Sciences et Technologies de Lille, Janvier 1997.

[Mil95] P.A.Millman, "Haptic Perception Of Localized Features", PhD Dissertation, Northwestern University, Evanston, Illinois, December 1995.

[Min90] M. Minsky, M. Ouh-Young, O. Steele, F.P. Brooks, M. Behensky, "Feeling and seeing: Issues in Force Display", Computer Graphics, Vol. 24, no. 2, SIG special issue 1990, pp. 235-243.

[Mor95] M. Moreyra, P. H. Marbot, S. Venema & B. Hannaford, "A 5-Axis Mini Direct Drive Robot for Teleoperation and Biotechnology", in Intellignet Robot and system (IRS), ed. Elsevier Science, 1995.

[Mul96] A. Mulder, "Hand Gesture for HCI", Technical Report 96-1, School of Kinesiology, Simon Fraser University, Canada, February 1996.

[Nig94] L. Nigay, "Conception et modélisation logicielles des systèmes interactifs : application aux interfaces multimodales ", Thèse de L'Université Joseph Fourier, Grenoble 1, 1994.

[Nou95] J. Nouiri, "Etude pour la conception de transducteur gestuels à retour d'effort", thèse Doctorat INPG, Novembre 1995.

[Pan91] X.D. Pang, H.Z. Tan, and N.I. Durlach, "Manual Discrimination of Force Using Active Finger Motion", Perception and Psychophysics, 1991, Vol. 49, pp. 531-540.

[Pat90] N.J.M.Patrick, T.B.Sheridan, M.J.Massimino, B.A.Marcus, "Design and testing of non-reactive, fingertip, tactile display for interaction with remote environments", MIT Department of Mechanical Engineering.

[PF96] Per-Force, http:// www.per.com/

[Poo95] P.K.Pook, "Teleasistance: Using Deitic Gestures to Control Robot Action", Phd dissertation, University of Rochester, Rochester, New York, 1995.

[Qui93] J.P. Quin, "L'apport de la téléprésence dans la teleconduite de véhicules rapides : le projet DARDS", IMAGINA 1993, Monaco, France.

[Raj89] G.J. Raju, "Design Issues in 2-port Network Models of Bilateral Remote Manipulation", IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.1316-1321 (1989).

[Ram91] C. Ramstein, "Analyse, représentation et traitement du geste instrumental", Thèse INPG, Grenoble, 1991.

[Ram94] C. Ramstein, V.Hayward , "The Pantograph: a large worspace haptic device for multimodal interaction ", proceeding of CHI'94, Interactive Experience.

[Ram96] C. Ramstein, O.Martial, A.Dufresne, M.Carignan, P.Chassé, P.Mabilleau, "Touching and Hearing GUI's : Design Issues for the PC-Access System", ASSETS'96, APRIL 1996, Vancouver, Canada.

[Raz86] A. Razafindrakoto, "Langage d'objets pour l'animation, implantation temps réel", Thèse INP Grenoble, 1986.

[Rhe91] H. Rheingold, "La Réalité virtuelle", Dunod, 1993.

[Ric93] P. Richard, G. Burdea, P. Coiffet, "Performances humaines dans des tâches impliquant des objets virtuels avec retour d'effort", Actes "L'interface des mondes réels et virtuels", Montpellier, Mars 1993.

[Rig85] R. Rigal," Motricité humaine : fondements et applications pédagogiques", Presse Universiatire du Québec, 1985.

[Rim91] B. Rimé, L. Schiaratura, "Gesture and Speech", in Fondamental of Nonverbal Behavior, Ed. R.S. Feldman, B. Rim, Press of the University of Cambridge, 1991, pp. 239-281.

[Ros86] H.E. Ross, A.J. Benson, "The Weber Fraction for Moment of Inertia", in Fechner Day 86, B. Berglung, U.Berglung and R.Teghtsoonian, ed. International Society for Psychophysics, Stockholm, 1986.

[Ros90] J. Rosebush, "Qu'est ce que la réalité virtuelle ?", Pixel n°13, 1990.

[Sca89] D. Scapin, D.L. et C. Pierret-Golbreich," MAD : Une méthode analytique de description des tâches", IHM'89, 1989, pp. 131-148.

[Sch79] R.A. Schmidt, H. Zelaznik, B. Hawkins, J.S. Frank, J.T. Quinn, " Motor-output variability : theory for the accuracy of rapid motor acts", Psychological Review, 1979, Vol. 86, pp. 415-451.

[Sch95] D.W. Schloerb, "A Quantitative Measure of Telepresence", Presence, Vol. 4, No. 1, Winter 1995, pp. 64-80.

[Str92] Y. Strassberg, A.A. Goldenberg, and J.K. Mills, " A New Control Scheme For Bilateral Teleoperating Systems : Performance Evaluation and Comparison", Proceeding of the IEEE International Conférence on Intelligent Robots and Systems, Raleigh, Juillet 1992.*

[Tan95] H.Z. Tan, N.I. Durlach, G.L. Beauregard,and M.A. Srinivasan, "Manual discrimination of compliance using active pinch grasp: The roles of force and work cues", Perception & Psychophysics, 1995,,Vol. 57, No. 4, pp. 495-510.

[Ter87] D.Terzopoulos, J.Platt, A.Barr & K.Fleischer, "Elastically Deformable Models", Computers Graphics, Proceedings of SIGGRAPH'87, 21(4), Juillet 1987, pp. 205-214.

[Tha91] N.Magnenat-Thalmann, & D. Thalmann, "Human Body Deformation Using Joint-dependent Local Operators and Finite-element Theory", inMaking them Move Edited by N.I.Badler, B.A.Barsky & D.Zeltzer, Morgan Kaufmann Publishers, 1991.

[Uhl96] C.Uhl, "Machine de simulation temps réel", Thèse de doctorat INPG, Juillet 1996.

[Wei54] Weiss, B., 1954, "The Role of Proprioceptive Feedback in Positioning Responses," Journal of Experimental Psychology, Vol. 47, no. 3, pp; 215-224.

[Woo49] R.S. Woodworth, "Psychologie expérimentale," Presses Universitaire de France, 1949.