

<b>Titre:</b>	Étude de la performance humaine en téléopération : le cas forestier
Title:	
<b>Auteur:</b>	Jean-François Lapointe
Author:	
<b>Date:</b>	1999
<b>Type:</b>	Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis
<b>Référence:</b>	Lapointe, J.-F. (1999). Étude de la performance humaine en téléopération : le cas forestier [Ph.D. thesis, École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie.
Citation:	<a href="https://publications.polymtl.ca/8630/">https://publications.polymtl.ca/8630/</a>

## Document en libre accès dans PolyPublie

Open Access document in PolyPublie

<b>URL de PolyPublie:</b>	<a href="https://publications.polymtl.ca/8630/">https://publications.polymtl.ca/8630/</a>
PolyPublie URL:	

<b>Directeurs de recherche:</b>	Jean-Marc Robert
Advisors:	

<b>Programme:</b>	Unspecified
Program:	

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉTUDE DE LA PERFORMANCE HUMAINE EN TÉLÉOPÉRATION:  
LE CAS FORESTIER

JEAN-FRANÇOIS LAPOLINTE

DÉPARTEMENT DE GÉNIE ÉLECTRIQUE ET DE GÉNIE INFORMATIQUE  
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

THÈSE PRÉSENTÉE EN VUE DE L'OBTENTION  
DU DIPLOME DE PHILOSOPHIAE DOCTOR (Ph.D.)  
(GÉNIE ÉLECTRIQUE)

AVRIL 1999

© Jean-François Lapointe, 1999.



National Library  
of Canada

Acquisitions and  
Bibliographic Services  
395 Wellington Street  
Ottawa ON K1A 0N4  
Canada

Bibliothèque nationale  
du Canada

Acquisitions et  
services bibliographiques  
395, rue Wellington  
Ottawa ON K1A 0N4  
Canada

*Your file* *Votre référence*

*Our file* *Notre référence*

The author has granted a non-exclusive licence allowing the National Library of Canada to reproduce, loan, distribute or sell copies of this thesis in microform, paper or electronic formats.

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque nationale du Canada de reproduire, prêter, distribuer ou vendre des copies de cette thèse sous la forme de microfiche/film, de reproduction sur papier ou sur format électronique.

The author retains ownership of the copyright in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur qui protège cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

0-612-46635-3

Canada

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Cette thèse intitulée:

ÉTUDE DE LA PERFORMANCE HUMAINE EN TÉLÉOPÉRATION:  
LE CAS FORESTIER

présentée par: LAPOINTE Jean-François  
en vue de l'obtention du diplôme de: Philosophiae Doctor  
a été dûment acceptée par le jury d'examen constitué de:

M. HURTEAU Richard, D.Eng., président  
M. ROBERT Jean-Marc, doctorat, membre et directeur de recherche  
M. FREEDMAN Paul, Ph.D., membre et codirecteur de recherche  
M. GOURDEAU Richard, Ph.D., membre  
M. BEAUCHAMP Yves, Ph.D., membre

**Pour Julie et pour la Science**

---

## **REMERCIEMENTS**

Je tiens à exprimer mes plus sincères remerciements à mon directeur de recherche, le professeur Jean-Marc Robert, ainsi qu'à mon codirecteur de recherche, monsieur Paul Freedman, pour leurs bons conseils, leurs commentaires judicieux et leur appui soutenu tout au long de cette thèse. Sans eux, cette thèse ne serait pas ce qu'elle est aujourd'hui.

Je désire également remercier le Centre de recherche informatique de Montréal et le Centre de formation professionnelle Mont-Laurier qui ont tout fait pour faciliter la réalisation de cette recherche.

Je souhaite aussi dire un sincère merci à tous les sujets qui, au nom de la science, ont bien voulu donner de leur temps et de leur patience lors de mes expériences.

Finalement, j'aimerais rappeler que cette recherche a été réalisée dans le cadre du projet ATREF (Application des Technologies Robotiques aux Équipements Forestiers, [Freedman, 1995]) grâce au soutien financier du programme Synergie du Ministère de l'Industrie, du commerce, de la science et de la technologie du Québec.

## RÉSUMÉ

Cette recherche vise à accroître l'état des connaissances sur la performance humaine et les interfaces de commande en téléopération forestière. Plus particulièrement, cette thèse s'intéresse à la commande des téléopérateurs forestiers à 4 ddl tels que les abatteuses-façonneuses, les porteurs et les chargeuses.

L'objectif fondamental est d'aider les concepteurs de ces machines à concevoir des interfaces de commande de qualité qui utilisent les possibilités offertes par l'informatique embarquée et les dispositifs de commande à plusieurs degrés de liberté pour améliorer la performance d'opération.

Dans un premier temps, nous avons réalisé une analyse de la tâche des opérateurs de ces machines forestières et une revue de la littérature portant sur les interfaces de commande, dans le but d'améliorer notre compréhension du domaine. Nous avons ensuite comparé entre elles huit interfaces de commande utilisant différentes combinaisons de dispositifs de commande, de modes de commande et de fonctions de gain. Cette première série d'essais fut suivie de trois autres qui ont permis de mesurer et modéliser l'effet de la pratique, de la distance de la cible, du rapport de taille cible/outil et des vitesses de déplacement du bras manipulateur sur la performance. Tous les essais se sont déroulés sur un simulateur graphique 3D de téléopérateur forestier où les sujets réalisaient des tâches de saisie de tige, typiques de celles rencontrées en milieu de travail.

Nous avons trouvé que la performance pouvait être caractérisée par quatre critères, soit le temps de mouvement, le taux d'erreur, l'écart longitudinal et l'écart d'orientation. Grâce à ces essais, nous savons également que l'utilisation de la commande coordonnée en vitesse et l'utilisation d'un dispositif de commande élastique à 4 ddl (appelé palonnier) améliorent la performance et la satisfaction des opérateurs novices et que leurs effets sont additifs.

Nous avons également découvert que l'apprentissage est le facteur qui influe le plus sur la performance des opérateurs. Ainsi, après 25 heures de pratique, un opérateur novice améliore en moyenne d'au moins 300% sa performance pour chacun des critères de performance utilisés, ce qui surpasse largement les gains initiaux offerts par les interfaces de commande les plus prometteuses testées ici.

Dans cette optique et en attendant une étude des effets sur la performance à plus long terme de la commande coordonnée en vitesse combinée à l'utilisation d'un palonnier, nous pensons que la formation des opérateurs novices sur un simulateur graphique 3D de machine forestière est une alternative intéressante au changement de l'interface de commande actuelle.

## ABSTRACT

The goal of this research was to augment the knowledge available on human performance and control interfaces in forestry teleoperation. This thesis focused on the control of four degree of freedom (DOF) forestry machines such as processing harvestors, forwarders and log loaders.

The principal objective was to improve the control interface of these machines by helping designers to conceive quality interfaces by using the various possibilities offered by embedded computing and multi-DOF input devices to improve performance.

We began our work by a task analysis of these machine's operators. This was followed by a comparison of eight control interfaces using different combinations of input devices, control mode and gain functions. Three other experiments followed this one to measure and model the effect on performance of: practice, target distance, target/tool size ratio and joint speeds of the manipulator arm. All the trials were done on a 3D graphic simulator of forestry machine where the subjects realized grabbing tasks typical of the work environment.

We found that performance can be characterized by four criteria which are: movement time, error rate, longitudinal error and orientation error. Thanks to these experiments, we now know that the use of coordinated rate control and the use of an elastic four DOF input device improve significantly the performance and the satisfaction of a novice operator compared to the actual control interface and that these effects are additive.

We also found that learning has the greatest effect on the operator's performance. For example, on average, a novice operator can improve his performance by at least a factor of three for each performance criteria after only 25 hours of practice, which greatly surpasses the initial improvement found with the most performing control interfaces tested here.

Knowing that, and in the absence of longer term human performance studies of the effects

of coordinated control combined with a four DOF input devices, we think that an initial training of the novice operators on a 3D graphic simulator could be a viable alternative to a change of the control interface of these machines.

## TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE .....	iv
REMERCIEMENTS .....	v
RÉSUMÉ .....	vi
ABSTRACT .....	viii
TABLE DES MATIÈRES .....	x
LISTE DES TABLEAUX .....	xv
LISTE DES FIGURES .....	xvi
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS .....	xiii
LISTE DES ANNEXES .....	xxiii
 INTRODUCTION .....	 1
 CHAPITRE I - ANALYSE DE LA SITUATION EN TÉLÉOPÉRATION FORESTIÈRE	 4
1.1 Introduction à la téléopération .....	4
1.1.1 L'interface humain-machine .....	5
1.2 Ergonomie et téléopération .....	7
1.3 Téléopération forestière .....	9
1.3.1 Contexte forestier .....	9
1.3.2 Analyse ergonomique de la tâche des opérateurs .....	12
1.4 Contexte de la recherche .....	20
 CHAPITRE II - REVUE DE LITTÉRATURE SUR LES INTERFACES DE COMMANDÉE EN TÉLÉOPÉRATION .....	 22
2.1 État des connaissances concernant les interfaces de commande en téléopération .....	22
2.1.1 Modes de commande et dispositifs d'entrée de données appropriés	22

2.1.2 Revue des modes de commande en vitesse .....	26
2.1.3 État des connaissances sur l'interface de commande matérielle ..	31
2.1.4 Revue des différentes fonctions de gain .....	34
2.1.5 Autres facteurs importants .....	37
2.2 Objectifs .....	37
2.3 Originalité et intérêt de la recherche .....	40
2.3.1 Définition de la performance humaine .....	40
2.3.2 Intérêt d'un modèle de performance .....	42
2.4 Hypothèses .....	44
 CHAPITRE III - DÉVELOPPEMENT DU BANC D'ESSAI ET PLAN	
EXPÉRIMENTAL .....	46
3.1 Survol de la littérature sur les environnements de simulation .....	47
3.1.1 Perception de la profondeur .....	47
3.1.2 Délai de traitement de l'information .....	48
3.2 Description du simulateur graphique .....	49
3.2.1 Description matérielle .....	50
3.2.2 Description logicielle .....	51
3.2.3 Description de la simulation .....	52
3.2.4 Contribution au développement du simulateur .....	52
3.3 Plan d'expérimentation .....	53
3.3.1 Description des tâches expérimentales .....	55
3.3.2 Définition des critères de performance .....	58
 CHAPITRE IV - ÉTUDE COMPARATIVE DE DIFFÉRENTES INTERFACES DE	
COMMANDÉ .....	62
4.1 Étude-pilote .....	63
4.1.1 Méthodologie .....	63

4.1.1.1 Tâches .....	63
4.1.1.2 Sujets .....	63
4.1.1.3 Système .....	64
4.1.1.4 Variables indépendantes .....	64
4.1.1.5 Variables dépendantes .....	67
4.1.1.6 Variables de contrôle .....	67
4.1.1.7 Procédure expérimentale .....	71
4.1.2 Résultats .....	73
4.2 Essais principaux .....	73
4.2.1 Objectifs .....	73
4.2.2 Méthodologie .....	74
4.2.2.1 Sujets .....	74
4.2.2.2 Système .....	74
4.2.2.3 Procédure expérimentale .....	74
4.2.2 Analyse des résultats .....	77
4.2.2.1 Prétraitement des données .....	77
4.2.2.2 Analyse de la variance (ANOVA) .....	77
4.2.2.3 Comparaisons multiples .....	78
4.2.2.4 Satisfaction .....	89
4.2.3 Discussion .....	90
4.3 Validation des résultats sur le terrain .....	93
4.3.1 Méthodologie .....	94
4.3.1.1 Tâche .....	95
4.3.1.2 Sujets .....	95
4.3.1.3 Système .....	95
4.3.1.4 Procédure expérimentale .....	96
4.3.2 Résultats .....	97
4.3.2.1 Première série d'essais .....	97

4.3.2.2 Deuxième série d'essais .....	98
4.3.2.3 Troisième série d'essais .....	99
4.3.3 Discussion .....	100
CHAPITRE V - APPRENTISSAGE ET MODÈLE DE PERFORMANCE .....	103
5.1 Effet de la pratique et de la distance de la cible sur la performance .....	104
5.1.1 Méthodologie .....	104
5.1.1.1 Tâches .....	104
5.1.1.2 Sujets .....	104
5.1.1.3 Système .....	105
5.1.1.4 Variables indépendantes .....	105
5.1.1.5 Variables dépendantes .....	106
5.1.1.6 Variables de contrôle .....	106
5.1.1.7 Procédure expérimentale .....	106
5.1.2 Analyse des résultats .....	109
5.1.2.1 Prétraitement des données .....	109
5.1.2.2 Tracé des graphes et analyse de la variance (ANOVA) ..	110
5.1.3 Discussion .....	124
5.2 Effet du rapport de taille cible/outil sur la performance .....	125
5.2.1 Méthodologie .....	125
5.2.1.1 Tâche .....	126
5.2.1.2 Sujets .....	126
5.2.1.3 Variables indépendantes .....	126
5.2.1.4 Variables dépendantes .....	126
5.2.1.5 Procédure expérimentale .....	127
5.2.2 Analyse des résultats .....	129
5.2.3 Discussion .....	134
5.3 Étude du critère de distance de la cible .....	134

5.3.1 Méthodologie .....	137
5.3.1.1 Tâche .....	137
5.3.1.2 Sujets .....	137
5.3.1.3 Variable indépendante .....	137
5.3.1.4 Variable indépendante .....	137
5.3.1.5 Variables de contrôle .....	138
5.3.1.6 Procédure expérimentale .....	138
5.3.2 Analyse des résultats .....	138
5.3.3 Discussion .....	139
 CHAPITRE VI - SYNTHÈSE ET RECOMMANDATIONS .....	142
6.1 Résultats expérimentaux .....	143
6.1.1 Évaluation des hypothèses .....	143
6.1.2 Au sujet de l'apprentissage .....	146
6.1.3 Modélisation de la performance .....	147
6.2 Discussion .....	149
 CONCLUSION .....	152
 RÉFÉRENCES .....	155
 ANNEXES .....	167

## **LISTE DES TABLEAUX**

Tableau 1.1: Taxonomie des téléopérateurs .....	6
Tableau 3.1: Description des différentes séries d'essais .....	55
Tableau 4.1: Liste des traitements possibles .....	65
Tableau 4.2: Assignation des traitements selon les sujets .....	76
Tableau 4.3: Résultats des tests d'analyse de la variance .....	78
Tableau 4.4: Résultats des fonctions de gain pour chacune des tâches .....	91
Tableau 4.5: Résultats des modes de commande coordonnée pour chacune des tâches	92
Tableau 5.1: Assignation des traitements selon les séries .....	107
Tableau 5.2: Ordre d'assignation des séries de traitements .....	108
Tableau 5.3: Résultats de régression pour le temps de mouvement .....	113
Tableau 5.4: Régression du temps de mouvement (coeff. d'apprentissage constant)	113
Tableau 5.5: Ajustement des modèles pour le taux d'erreur .....	117
Tableau 5.6: Ajustement des modèles pour l'écart longitudinal .....	120
Tableau 5.7: Ajustement des modèles pour l'écart d'orientation .....	123
Tableau 5.8: Assignation des rapports de taille cible/pince selon les séries de traitements .....	127
Tableau 5.9: Ordre d'assignation des séries de traitement .....	128
Tableau 5.10: Ajustement des différents modèles pour le taux d'erreur .....	131
Tableau 5.11: Valeur du paramètre b en fonction des rapports de taille cible/pince ..	131
Tableau 5.12: Distances et temps de parcours articulaires des cibles utilisées .....	136

## LISTE DES FIGURES

Figure 1.1: La téléopération schématisée .....	4
Figure 1.2: Exemples de téléopérateurs à 4 degrés de liberté .....	14
Figure 1.3: Géométrie des manipulateurs forestiers à 4 ddl .....	15
Figure 1.4: Illustration de la cabine de l'opérateur et de son interface de commande ..	16
Figure 2.1: Différents modes de commande en vitesse .....	29
Figure 2.2: Orientation de la tête vs mode de commande suite à une rotation de la base	31
Figure 2.3: Interfaces matérielles étudiées .....	34
Figure 2.4: Temps de manipulation en fonction du gain .....	35
Figure 2.5: Fonctions de gain pour la commande en vitesse .....	36
Figure 3.1: Illustration du simulateur graphique avec interface conventionnelle .....	50
Figure 3.2: Tâche de saisie verticale (début) .....	56
Figure 3.3: Tâche de saisie verticale (fin) .....	56
Figure 3.4: Tâche de saisie horizontale avec texture au sol et à l'arrière-plan .....	57
Figure 3.5: Illustration du critère de succès ou d'erreur de saisie .....	60
Figure 3.6: Illustration des critères de précision .....	61
Figure 5.1: Temps de mouvement vs pratique et distance (tâche 1) .....	111
Figure 5.2: Temps de mouvement vs pratique et distance (tâche 2) .....	111
Figure 5.3: Taux d'erreur vs pratique et distance (tâche 1) .....	115
Figure 5.4: Taux d'erreur vs pratique et distance (tâche 2) .....	115
Figure 5.5: Taux d'erreur vs pratique et type de tâche .....	116

Figure 5.6: Écart longitudinal vs pratique et distance (tâche 1) .....	118
Figure 5.7: Écart longitudinal vs pratique et distance (tâche 2) .....	118
Figure 5.8: Écart longitudinal vs pratique et tâche .....	119
Figure 5.9: Écart d'orientation vs pratique (tâche 1) .....	121
Figure 5.10: Écart d'orientation vs pratique (tâche 2) .....	121
Figure 5.11: Taux d'erreur vs pratique et diamètre de cible .....	130
Figure 5.12: Modélisation du paramètre b .....	132

## **LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS**

**A:** un des trois côtés d'un triangle quelconque

**ANOM:** analyse de la moyenne

**ANOVA:** analyse de la variance

**ATREF:** application des technologies robotiques aux équipements forestiers

**b:** constante déterminée expérimentalement lors de la régression d'un modèle exponentiel

**B:** un des trois côtés d'un triangle quelconque

**c:** constante déterminée expérimentalement lors de la régression d'un modèle exponentiel

**cart:** cartésien

**cyl:** cylindrique

**C:** un des trois côtés d'un triangle quelconque

**C<sub>1</sub>:** constante déterminée expérimentalement dans la loi de Fitts (voir annexe 1)

**C<sub>2</sub>:** constante déterminée expérimentalement dans la loi de Fitts (voir annexe 1)

**d:** ordonnée à l'origine de la droite déterminée expérimentalement lors d'une régression linéaire

**ddl:** degré de liberté

**d<sub>2</sub>:** facteur de correction du biais utilisé pour évaluer la variance

**D:** distance de la cible à atteindre dans la loi de Fitts (voir annexe 1)

**DF:** "degree of freedom", version anglaise de ddl

**D<sub>3</sub>:** facteur de contrôle pour limite inférieure de l'étendue

**D<sub>4</sub>:** facteur de contrôle pour limite supérieur de l'étendue

e: pente de la droite déterminée expérimentalement lors d'une régression linéaire

$E_1$ : erreur longitudinale lors de la première exécution d'une tâche de saisie

$EO_1$ : erreur d'orientation lors de la première exécution d'une tâche de saisie

f: fonction quelconque

$f^{-1}$ : inverse de la fonction f qui lui est associée

F: valeur calculée lors d'un test d'analyse de la variance

$g_{\alpha, k, v}$ : valeur tirée d'une table de distribution de l'étendue de Student

HSD: critère utilisé dans le test de comparaisons multiples de Tukey pour voir si deux groupes différent de façon significative (tiré de l'anglais "honestly significant difference")

Hz: hertz, nombre de cycle exécutés par seconde

i: indice utilisé pour distinguer différentes variables

J: matrice jacobienne, utilisée pour calculer le modèle cinématique direct (voir annexe 4)

$J^{-1}$ : matrice jacobienne inverse, utilisée pour calculer le modèle cinématique inverse (voir annexe 4)

k: nombre de groupes comparés

$k_1$ : constante empirique qui lie les temps de déplacement initial et minimal

log: logarithme

$L_1$ : longueur de la première membrure du bras manipulateur (voir annexe 3)

$L_2$ : longueur de la deuxième membrure du bras manipulateur (voir annexe 3)

$LCL_R$ : limite de contrôle inférieure de l'étendue

m: mètre

**max(): maximum de la valeur inscrite entre les parenthèses**

**min(): minimum de la valeur inscrite entre les parenthèses**

**ms: milliseconde**

**Mo: méga-octet**

**MHz: mégahertz**

**MS: carrés moyens (tiré de “mean square”)**

**n: taille des groupes lors d'une analyse statistique ou nombre de pratiques effectuées**

**N: newton**

**N·m: newton-mètre**

**p: probabilité d'erreur lors de l'application d'un test statistique**

**q<sub>i</sub>: variables de position et d'orientation du référentiel outil p/r au référentiel absolu,**

**i = 1..6**

**r: distance radiale du référentiel outil du bras manipulateur (voir annexe 3)**

**R: étendue**

**R: étendue moyenne**

**R<sup>2</sup>: coefficient de détermination, qui indique le taux de variation des données expliquées par un modèle empirique**

**s: seconde**

**s<sup>2</sup>: variance**

**Smax: signal de commande maximal**

**SS: somme des carrés (tiré de “sum of square”)**

$t$ : temps ou distance tangentielle du référentiel outil (voir annexes 3 et 4)

$tang$ : tangentiel

$^T$ : symbole de transposée d'une matrice

$T_1$ : temps nécessaire pour exécuter une tâche la première fois

$T_n$ : temps nécessaire pour exécuter une tâche à la  $n$ ième fois

$TD_1$ : temps de déplacement initial

$TS_1$ : temps de saisie initial

$UCL_R$ : limite de contrôle supérieure de l'étendue

$V_{uniforme}$ : vitesse uniforme

$V_{max}$ : vitesse maximale

$V_{max,i}$ : vitesse maximale de la  $i$ ème articulation du bras manipulateur

$V_{max} |_{v.t.}$ : ensemble des vitesses maximales pouvant être atteintes par l'outil d'un bras manipulateur dans tout son volume de travail

$V_{max} |_{\Theta}$ : vitesse maximale que peut atteindre l'outil d'un bras manipulateur dans une pose ou configuration  $\Theta$  donnée

$V_{optimum}$ : vitesse optimum

$W$ : taille de la cible à atteindre dans la loi de Fitts (voir annexe 1)

$x$ : position cartésienne du référentiel outil du bras manipulateur (voir annexe 3)

$X$ : vecteur associé à une position de l'outil dans l'espace de commande coordonné choisi

$y$ : position cartésienne

$z$ : position verticale du référentiel outil du bras manipulateur (voir annexe 3)

$\alpha$ : coefficient d'apprentissage, selon la loi de la pratique (voir annexe 2)

$\phi$ : orientation de l'outil du bras manipulateur dans le plan horizontal en commande  
coordonnée

$\theta_i$ : position de la  $i$ ème articulation du bras manipulateur,  $i = 1 \dots 4$  (voir annexe 3)

$\Theta$ : vecteur associé à une pose (aussi appelée configuration) quelconque du bras  
manipulateur

$v$ : nombre de degrés de liberté de la moyenne de l'étendue

$\Delta\theta_i$ : distance articulaire qui sépare la position initiale de la position de saisie d'une  
articulation du bras manipulateur

$\Delta t$ : intervalle de temps

$^\circ$ : degré angulaire

$\cdot$ : signe ajouté au-dessus d'une variable pour indiquer sa dérivée

$\bar{\cdot}$ : signe ajouté au-dessus d'une variable pour indiquer sa valeur moyenne

$\partial$ : symbole de dérivée partielle

**LISTE DES ANNEXES**

ANNEXE 1: Loi de Fitts .....	167
ANNEXE 2: Loi de la pratique .....	169
ANNEXE 3: Modèles géométriques directs et inverses du téléopérateur .....	170
ANNEXE 4: Modèles cinématiques directs et inverses du téléopérateur .....	179
ANNEXE 5: Données expérimentales de l'étude comparative des interfaces .....	185
ANNEXE 6: Données expérimentales sur l'apprentissage et la distance de la cible ..	198
ANNEXE 7: Données expérimentales sur le rapport de taille cible/pince .....	214
ANNEXE 8: Données expérimentales sur le critère de distance de la cible .....	230
ANNEXE 9: Test de comparaisons multiples de Duncan .....	231
ANNEXE 10: Données expérimentales des essais sur le terrain .....	233
ANNEXE 11: Analyse de la moyenne multifactorielle .....	238

## INTRODUCTION

L'industrie forestière est la plus importante au Canada pour ce qui est de la contribution nette à l'économie et du nombre d'emplois qui lui sont directement et indirectement reliés [Heidersdorf, 1987; Courteau, 1994]. Cependant, pour faire face à la mondialisation des marchés et à la compétition féroce des différents pays producteurs de bois, elle doit constamment accroître sa productivité. De plus, l'adoption de normes environnementales plus sévères bouleverse les façons de faire traditionnelles et force l'adoption de nouvelles méthodes de travail.

Ces deux facteurs réunis ont favorisé l'apparition récente sur le marché d'une nouvelle génération de machines forestières qui servent à récolter le bois en forêt. Ces nouvelles machines, appelées abatteuses-façonneuses, permettent l'abattage, l'ébranchage, le tronçonnage sur mesure, l'empilage et l'écimage d'un arbre sur pied en une seule série d'opérations. On transforme ainsi un arbre sur pied en une pile de billes de la longueur désirée, prêtes à être utilisées en moins de 30 secondes.

Malgré tous leurs avantages, ces nouvelles machines forestières sont plus difficiles à opérer que les machines forestières classiques. Il en résulte que typiquement, un opérateur doit opérer une machine entre 4 et 6 mois avant d'atteindre un niveau de productivité rentable (grossièrement 80 tiges récoltées par heure) [Lapointe, 1995]. Il y a donc place à l'amélioration.

Afin de réduire la période d'apprentissage permettant d'atteindre un niveau de productivité rentable sur ce type de machine, une avenue possible est d'améliorer l'interface de commande actuelle qui est peu intuitive et difficile à utiliser. En effet, l'utilisation de l'informatique embarquée et de techniques de commande empruntées à la télérobotique peut réduire la charge de travail des opérateurs et ainsi accélérer leur apprentissage et les rendre productifs plus rapidement.

Vu la nouveauté de ces machines forestières, peu d'études se sont intéressées à la performance des opérateurs autant durant l'apprentissage que durant l'utilisation de ces dernières. Cette recherche a donc pour but de tester l'impact de nouvelles interfaces de commande sur la performance humaine dans un contexte de téléopération. Vu le coût prohibitif de modification des téléopérateurs existants, la présente recherche utilise la simulation graphique comme banc d'essai pour développer une méthode d'évaluation rigoureuse visant à comparer entre elles les nouvelles interfaces de commande sur ce type de machine.

Le premier chapitre de cette thèse introduit le lecteur à la problématique de l'utilisation des téléopérateurs forestiers modernes et décrit le contexte et les motivations de cette recherche.

Le chapitre 2 fait état des connaissances concernant les interfaces de commande et propose différentes avenues pour améliorer l'interface de commande des téléopérateurs forestiers actuels. De plus, on y énonce les objectifs et les hypothèses de cette recherche tout en y précisant la portée de l'ouvrage.

Le chapitre 3 explique le processus de conception et les caractéristiques du simulateur graphique utilisé comme banc d'essai lors de la réalisation des expériences. On y décrit également le plan expérimental mis en place pour atteindre les objectifs fixés.

Le chapitre 4 présente les deux premières séries d'essais expérimentaux qui ont été effectuées pour comparer la performance des différentes interfaces de commande. La première série d'essais consiste en une étude pilote qui a permis de valider les idées proposées au chapitre 2 quant à la conduite des expériences. La seconde série d'essais vise quant à elle à recueillir des données expérimentales sur la performance humaine obtenue à partir des différentes interfaces de commande. On présente donc les résultats de ces deux séries d'essais.

Le chapitre 5 présente deux autres séries d'essais expérimentaux qui visent à mesurer la performance des opérateurs lors de l'utilisation de l'interface de commande actuelle durant la phase d'apprentissage. La première série d'essais concerne l'effet de la pratique et de la distance de la cible sur la performance lors de tâches de saisie. Quant à la seconde série d'essais, elle concerne l'effet du rapport entre la taille de la cible et celle de l'outil de saisie (la pince) sur la performance. Elle tente également de préciser la notion de distance de la cible, toujours lors de tâches de saisie. Finalement, on y développe un modèle empirique de performance qui reflète bien les résultats obtenus, tout en tenant compte des divers facteurs qui affectent la performance. Cette étape cruciale permet de mieux mettre en relief les résultats obtenus auparavant en tenant compte de la pratique (l'expérience) des opérateurs comme variable prédominante de leur performance.

Finalement, le chapitre 6 présente la synthèse des résultats obtenus et précise leur contribution à l'avancement des connaissances dans le domaine. On y émet également des recommandations et des lignes directrices pour orienter les recherches futures.

# CHAPITRE I - ANALYSE DE LA SITUATION EN TÉLÉOPÉRATION FORESTIÈRE

## 1.1 Introduction à la téléopération

La téléopération consiste à opérer à distance un ou plusieurs outils (pince, pelle, torche, caméra ou autres) fixés au bout d'un ou de plusieurs bras manipulateurs par l'intermédiaire d'une interface humain-machine. Les bras manipulateurs peuvent être fixes ou montés sur une base mobile. L'ensemble outils, bras et, s'il y a lieu, base mobile, est appelé téléopérateur ou encore télémanipulateur.

La téléopération vise généralement à augmenter les capacités de l'humain ou à isoler celui-ci d'un environnement hostile, tel qu'un site radioactif, un champ de bataille, etc.

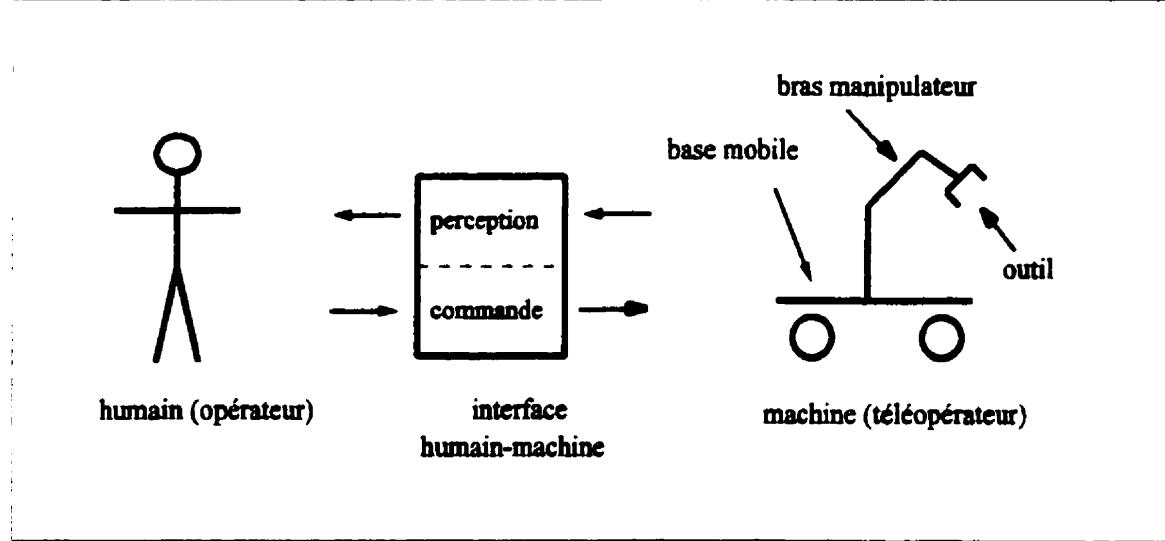


Figure 1.1 La téléopération schématisée

Il y a trois éléments essentiels en téléopération: l'humain (l'opérateur), la machine (le téléopérateur) et l'interface humain-machine qui les relie.

### 1.1.1 L'interface humain-machine

L'interface humain-machine peut être divisée en deux blocs: l'interface de perception et l'interface de commande (figure 1.1).

L'interface de perception sert à transmettre à l'opérateur les informations nécessaires à sa compréhension de l'environnement du téléopérateur et des opérations effectuées par celui-ci. Ces informations qui peuvent être sous formes visuelle, auditive ou haptique<sup>1</sup>, sont acquises par le téléopérateur à l'aide de différents capteurs (caméras, télémètres, microphones, jauge de contraintes, etc.) puis retransmises à l'opérateur grâce à des dispositifs de présentation de l'information tels que cadrans, écrans vidéo, haut-parleurs, manettes à retour d'effort, etc.

Lorsque l'opérateur est situé à proximité ou à bord du téléopérateur, il peut directement en observer les actions et ne requiert généralement pas d'interface de perception de l'aire de travail puisque celle-ci s'effectue déjà de façon naturelle.

L'interface de commande, quant à elle, transmet au téléopérateur les commandes de l'opérateur. Elle peut être constituée de différents dispositifs d'entrée de données tels que claviers, souris, pédales, boutons, leviers, manettes, palonniers, bras maître-esclaves, etc.

### 1.1.2 Le téléopérateur

On classe généralement les téléopérateurs selon leurs caractéristiques physiques, mais aussi parfois selon le type d'interface humain-machine utilisé pour les opérer. Le tableau 1.1 ci-après énumère ainsi de façon non-exhaustive les différents paramètres d'un téléopérateur et de son interface humain-machine qui permettent de le catégoriser.

---

<sup>1</sup> *Haptique*: qui est relié à la perception kinesthésique (ou proprioceptive) et tactile.

**Tableau 1.1 Taxonomie des téléopérateurs**

<b>Téléopérateur:</b> Fixe ou mobile	
Nombre de bras manipulateurs	
Agencement du ou des bras manipulateurs:	<ul style="list-style-type: none"> <li>- nombre de degrés de liberté (ddl)</li> <li>- configuration géométrique</li> </ul>
<b>Interface de perception: sert à présenter un modèle de l'environnement</b>	
Visuelle:	<ul style="list-style-type: none"> <li>- vue directe</li> <li>- vue indirecte (téléprésence), avec ou sans délais</li> </ul>
Auditive:	<ul style="list-style-type: none"> <li>- avec ou sans retour sonore</li> </ul>
Haptique:	<ul style="list-style-type: none"> <li>- avec ou sans retour d'effort</li> <li>- avec ou sans retour tactile</li> </ul>
<b>Interface de commande: sert à transmettre les commandes au téléopérateur</b>	
Modes de commande:	<ul style="list-style-type: none"> <li>- commande tout ou rien</li> <li>- commande articulaire, en position ou en vitesse</li> <li>- commande coordonnée, en position ou en vitesse</li> <li>- commande supervisée (télérobotique)</li> </ul>
Dispositifs d'entrée de données et de commande (interface matérielle):	
- Type:	<ul style="list-style-type: none"> <li>- discret: <ul style="list-style-type: none"> <li>- touches, boutons, claviers, interrupteurs</li> <li>- voix (reconnaissance de la parole)</li> </ul> </li> <li>- continu: <ul style="list-style-type: none"> <li>- rigidité: isotonique, élastique ou isométrique</li> <li>- nombre de degrés de liberté (ddl): <ul style="list-style-type: none"> <li>1 ddl: leviers, pédales, glissières, potentiomètres</li> <li>2 ddl: manettes, souris</li> <li>3 ddl &amp; +: palonniers, gants, souris 3D, bras maître-esclave</li> <li>- étendue du mouvement de chaque ddl</li> </ul> </li> </ul> </li> </ul>
- Nombre de dispositifs d'entrée de données et de commande	
- Agencement dans l'espace de travail de l'opérateur	

## 1.2 Ergonomie et téléopération

Du point de vue ergonomique, un des principaux défis en téléopération consiste à définir l'interface humain-machine qui permet d'opérer le téléopérateur de façon optimale en termes de productivité, de qualité et de sécurité tout en garantissant la satisfaction de l'opérateur.

Idéalement, la performance de l'opérateur lors d'une tâche de téléopération ne doit pas être limitée par l'interface humain-machine ou par les capacités physiques ou mentales de l'opérateur, mais plutôt par les capacités physiques du téléopérateur (par exemple, la vitesse maximale de déplacement du bras manipulateur ou vitesse maximale d'opération de l'outil).

Or, généralement, un opérateur ne devient pleinement productif qu'après une période d'apprentissage d'une durée d'autant plus grande que les opérations à effectuer sont complexes<sup>2</sup>. Ces opérations, généralement exécutées en parallèle [Lapointe, 1995], sont principalement de trois ordres, soit:

- 1) la planification des tâches;
- 2) la manipulation de l'outil;
- 3) l'opération de l'outil.

La planification des tâches consiste à définir, ordonner et optimiser les opérations de façon à minimiser le temps d'exécution des tâches, tout en évitant les obstacles qui se trouvent sur le parcours du téléopérateur et des objets qu'il manipule.

---

<sup>2</sup> En foresterie par exemple, les opérateurs d'abatteuses-façonneuses (un téléopérateur forestier typique) ont besoin de 4 à 6 mois d'expérience avant de devenir assez productifs pour être rentables [Lapointe, 1995], leur productivité maximale (mesurée selon le nombre de tiges récoltées par heure d'opération productive de la machine) étant atteinte au bout de 2 ans environ [Richardson, 1994b; Freedman, 1998].

La manipulation de l'outil concerne les déplacements de ce dernier à l'aide du bras manipulateur, c'est-à-dire l'évolution temporelle de sa position et de son orientation dans l'espace. L'opérateur manipule l'outil par l'intermédiaire de l'interface de commande, généralement grâce à des dispositifs de commande continus actionnés manuellement.

Finalement, l'opération de l'outil consiste à utiliser l'outil de façon à mener à bien l'exécution de la tâche. Les outils utilisés peuvent être aussi simples qu'une pince (outil binaire qui est soit ouvert ou fermé) ou encore multifonctionnels, comme dans le cas d'une abatteuse-façonneuse où l'outil permet la saisie, l'abattage, l'ébranchage, le mesurage et le tronçonnage des arbres.

Comme nous le verrons plus loin, la manipulation de l'outil occupe plus de 50% du temps d'opération en téléopération forestière. De plus, la planification des tâches et l'opération de l'outil varient d'un téléopérateur à l'autre. Pour ces raisons, nos recherches visent à améliorer la manipulation.

## 1.3 Téléopération forestière

Avant d'aller plus avant dans cette thèse, il est important de bien comprendre le sujet qui nous intéresse, à savoir la téléopération forestière. Dans ce but, notre première démarche a été d'étudier le contexte forestier moderne, d'analyser la tâche des opérateurs ainsi que leur formation et leur situation de travail. Finalement, nous avons étudié les différentes possibilités et contraintes technologiques qui concerne l'augmentation de la productivité.

### 1.3.1 Contexte forestier

Les choses ont bien changé depuis le début du siècle où les bûcherons coupaien les arbres manuellement à coup de hache, de sciotte et de godendard.

En effet, aujourd'hui la plus grande partie de la récolte forestière se fait à l'aide de machines forestières avec un taux de mécanisation toujours croissant qui atteignait 76 % dans l'est et le centre du Canada en 1991 [Richardson, 1994] et 77% au Québec en 1994 [Claveau, 1995], des taux comparables à ceux des pays scandinaves tels que la Finlande où le taux atteignait 65% en 1992 [Juntunen, 1993].

Les téléopérateurs forestiers actuels servent à récolter et manutentionner le bois issu de nos forêts. On peut répartir ces téléopérateurs en deux grandes catégories, soit ceux utilisés pour la coupe en bois long et ceux utilisés pour la coupe en bois court.

La coupe en bois long est encore la méthode de coupe la plus utilisée de nos jours avec environ les deux tiers du volume de bois récolté issu de la coupe mécanisée. Cette méthode consiste à couper les arbres pour ensuite les traîner sur le sol jusqu'au bord du chemin forestier où ils sont ensuite ébranchés avant d'être transportés jusqu'à l'usine de transformation.

L'utilisation de cette méthode remonte aux années 1960 lors de la mécanisation des opérations forestières. Cette méthode recourt présentement à trois types de machines forestières à fonction unique, soit les abatteuses, les débusqueuses (aussi appelées débardeurs) et les ébrancheuses.

Comme leur nom l'indique, les abatteuses servent à abattre les arbres en forêt; les débusqueuses servent à remorquer les arbres hors du bois jusqu'au chemin forestier et les ébrancheuses servent à ébrancher les arbres amenés au bord du chemin. On utilise également une autre machine, la chargeuse, pour le chargement du bois en forêt sur les camions de transport et pour le déchargement à l'usine.

Cette méthode de coupe endommage le sol et les repousses qui sont écrasés par les arbres traînés par terre. Elle endommage également les arbres récoltés et contamine la matière ligneuse de particules de terre et de sable. Il en résulte des pertes de matière première et des torts incompatibles avec une culture renouvelable des ressources forestières.

C'est pour ces raisons et suite au resserrement des normes environnementales un peu partout dans le monde que l'on revient de plus en plus à la méthode utilisée avant l'arrivée des machines en forêt, la coupe en bois court.

La coupe en bois court consiste à abattre, ébrancher et transformer un arbre en billes directement sur place avant de le transporter au chemin forestier. À la différence d'autrefois cependant, et surtout depuis les années 1980, les opérations de coupe en bois court sont maintenant mécanisées.

Les machines forestières utilisées pour la coupe en bois court sont de deux types, soit les abatteuses-façonneuses et les porteurs. Les abatteuses-façonneuses sont des machines multifonctionnelles qui abattent, ébranchent, tronçonnent et empilent les billes d'un arbre sur pied en une seule série d'opérations. Les porteurs, quant à eux, servent à charger les

billes et à les transporter jusqu'au chemin forestier. Ensemble, ils permettent de réaliser la tâche effectuée par les trois machines utilisées pour la coupe en bois long.

Les machines forestières de coupe en bois court occupent de plus en plus de place en foresterie avec une part du marché mondial qui a atteint 30% en 1996 et qui ne cesse de croître [Drushka, 1997]. La situation est la même dans l'est du Canada (qui comprend toutes les provinces à l'exception de la Colombie britannique, de l'Alberta et de l'Ile du Prince Édouard) où on prévoit une hausse de la proportion du volume de bois récolté par la méthode bois court qui atteindra 28% du volume total en 2001, soit le double de la proportion de 1991 [Gingras, 1992]. Finalement, un sondage effectué au Québec en 1994 auprès de gestionnaires et d'entrepreneurs forestiers indiquait que ceux-ci prévoyaient en moyenne qu'en 1999, la proportion du volume de bois récolté au Québec selon la méthode bois court serait supérieure à 48% [Gélinas, 1994].

Bien que les abatteuses-façonneuses soient plus complexes que les porteurs ou les chargeuses en raison de leurs multiples fonctions, ces machines sont néanmoins semblables puisqu'il s'agit dans tous les cas de téléopérateurs forestiers munis d'un bras manipulateur à 4 ddl<sup>3</sup>. Nous décrivons ces téléopérateurs plus en détails à la section suivante.

Comme l'avenir semble prometteur pour les téléopérateurs forestiers à 4 ddl, il est important de voir comment on peut améliorer la productivité des machines. C'est pour cette raison que nous sommes d'abord allés étudier le déroulement des opérations directement sur le terrain.

---

<sup>3</sup> *Degré de liberté (ddl):* possibilité d'un mouvement de translation ou de rotation selon un axe d'un corps rigide. Ainsi, un bras manipulateur à n ddl peut se déplacer selon n mouvements de translation ou de rotation simple autour d'un axe.

### **1.3.2 Analyse ergonomique de la tâche des opérateurs**

Nous avons procédé à l'analyse du travail de téléopération forestière avec le système de récolte en bois court. Cette analyse effectuée sur le terrain a permis de mieux comprendre la situation de travail, c'est-à-dire la nature, l'organisation, la fréquence, la durée et la complexité des tâches réalisées par les opérateurs, ainsi que les aspects techniques, économiques et organisationnels qui les entourent. Finalement, cette analyse a permis d'étudier les conditions de travail et la place de la sécurité au travail.

#### **1.3.2.1 Méthodologie**

Trois techniques de recueil de données ont été utilisées, soit la revue de documentation, l'observation et l'entrevue semi-structurée. Cinq opérateurs, dont deux novices (ayant moins d'un mois de pratique) et deux experts (formateurs) ont participé à l'étude, leur expérience variant entre une semaine et cinq ans. Le recueil des données s'est effectué en trois phases, soit: entrevue avec les formateurs (une journée), visite du milieu de travail (une journée) et validation auprès des opérateurs (une demi-journée). Les opérateurs travaillaient sur deux modèles similaires d'abatteuses-façonneuses sur roues, soit les modèles FMG Timberjack 1270 et Rottne SMV Rapid.

Il est important de noter que cette analyse de tâche a mené à la rédaction d'un rapport et d'un article [Lapointe, 1994; Lapointe, 1995] et qu'elle a été suivie d'un stage de près d'un an dans un centre de formation professionnelle pour opérateurs d'abatteuse-façonneuses. L'auteur a pu y analyser encore plus en profondeur la formation dispensée à cinq classes de futurs opérateurs ainsi que l'opération des abatteuses-façonneuses en forêt. De ce stage a résulté la rédaction d'un ouvrage didactique concernant l'opération des abatteuses-tronçonneuses en forêt [Lapointe, 1997].

Ce stage a également permis de valider personnellement les informations recueillies suite à l'analyse de tâche, grâce à l'essai, ainsi qu'à l'observation de l'apprentissage et de l'opération de différents modèles d'abatteuses-tronçonneuses (sur roues et sur chenille) par les étudiants et les formateurs du centre de formation.

### 1.3.2.2 Situation de travail

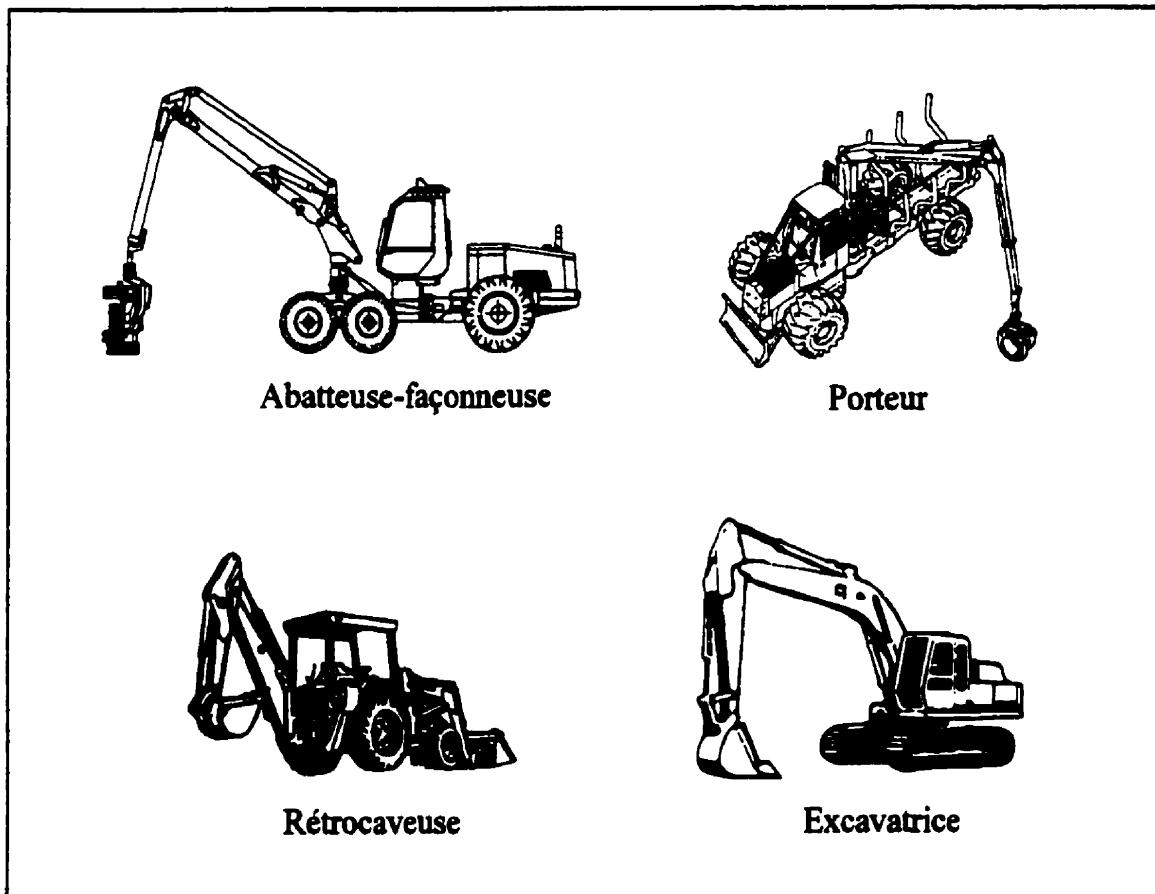
*Tâche:* L'opérateur doit s'occuper de la vérification, de l'entretien, de la mise au point, de la manoeuvre, de la réparation et du dépannage de son véhicule. Il passe en moyenne de 70% à 80% de son temps à opérer son véhicule, c'est-à-dire à le déplacer sur le site de coupe et à récolter du bois. Nous avons concentré notre étude sur la récolte, car c'est cette tâche en particulier qui exige l'utilisation du bras manipulateur et donc sa commande.

Dans le cas d'une abatteuse-façonneuse, la récolte consiste à saisir, abattre, ébrancher, tronçonner et empiler les résineux situés dans l'enveloppe de travail du téléopérateur. Les arbres récoltés doivent être coupés le plus près possible du sol, la norme étant d'un maximum de 30 cm du sol l'été et de 60 cm l'hiver, à cause de la neige.

Pour les porteurs, la récolte consiste à saisir et à charger les billes empilées par l'abatteuse-façonneuse tout au long de son parcours en forêt. Le porteur revient ensuite au chemin de camionnage où il décharge ses billes et les empile en attendant leur transport à l'usine de transformation.

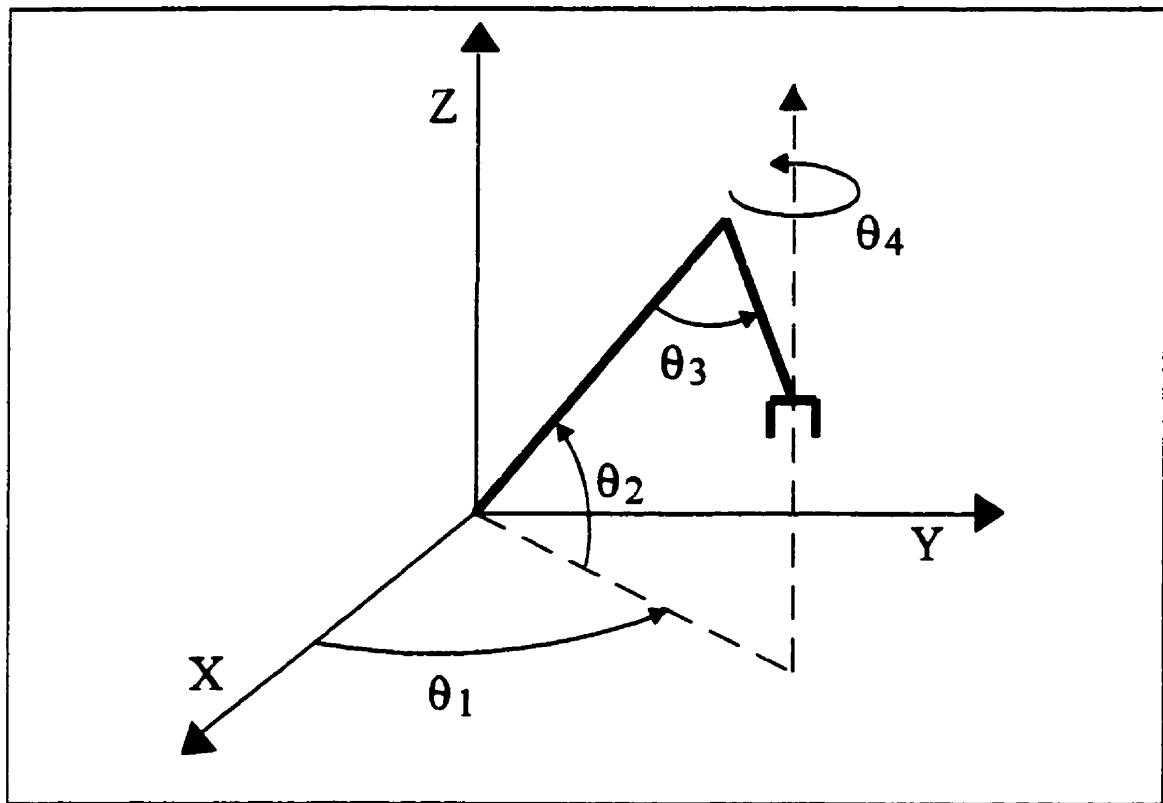
Peu importe le téléopérateur forestier à 4 ddl utilisé, la manipulation de l'outil représente toujours plus de la moitié du temps d'opération et la tâche commune à tous ces téléopérateurs est la saisie de billes de bois d'un diamètre minimal de 9 cm.

*Aspects techniques:* Pour pouvoir manipuler (positionner et orienter) de façon quelconque un outil dans l'espace 3D, un bras manipulateur requiert un minimum de 6 degrés de liberté (ddl). Cependant, plusieurs tâches peuvent être effectuées convenablement à l'aide d'un bras manipulateur à 4 ddl. C'est d'ailleurs le cas de la plupart des téléopérateurs utilisés dans le domaine forestier et celui de la construction tel qu'illustré à la figure 1.2.



**Figure 1.2** Exemples de téléopérateurs à 4 degrés de liberté

Dans tous ces cas, 3 ddl servent au positionnement de l'outil dans l'espace de travail, tandis que le quatrième ddl sert à orienter l'outil, soit dans le plan horizontal comme en foresterie (figure 1.3), soit dans le plan vertical, comme c'est le cas en construction, par exemple pour une excavatrice.



**Figure 1.3** Géométrie des manipulateurs forestiers à 4 ddl

Malgré les similarités physiques avec leurs cousins du domaine de la construction, les téléopérateurs forestiers n'exécutent pas le même genre de tâche qu'en construction. Ainsi, en foresterie, les téléopérateurs exécutent surtout des tâches de saisie d'une ou plusieurs billes de bois tandis qu'en construction, les téléopérateurs doivent plutôt faire suivre des trajectoires précises à leur outil terminal, par exemple pour creuser un fossé à l'aide d'un godet.

Vu la nature différente des tâches exécutées dans ces deux domaines et comme cette recherche s'intéresse d'abord aux équipements forestiers, les conclusions qui seront tirées se limiteront aux téléopérateurs forestiers à 4 ddl.

Toutes les interfaces de commande utilisées présentement pour opérer les téléopérateurs forestiers utilisent un mode de commande articulaire en vitesse basé sur une technologie de commande hydraulique proportionnelle. L'opérateur commande donc séparément la vitesse de déplacement de chacune des quatre articulations du bras manipulateur à l'aide de deux manettes de commande élastiques<sup>4</sup> à 2 ddl (voir figure 1.4). Finalement, il déplace le téléopérateur à l'aide de pédales situées devant lui et utilise l'ordinateur et le tableau de bord pour connaître et régler l'état de la plupart des nombreux paramètres de sa machine.

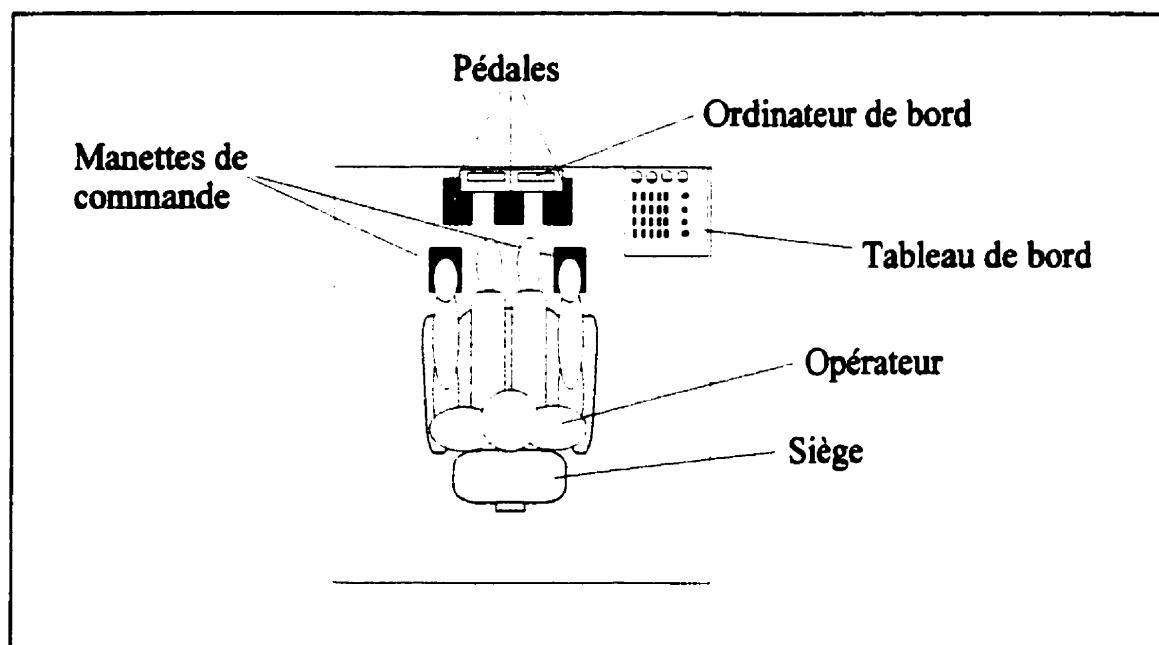


Figure 1.4 Illustration de la cabine de l'opérateur et de son interface de commande

*Aspects économiques:* La productivité d'un opérateur d'abatteuse-façonneuse est évaluée selon le nombre moyen de tiges (arbres) commercialisables qu'il peut récolter en une heure. Un bon opérateur récolte en moyenne 100 tiges à l'heure, tandis qu'un novice (ayant 2 mois de pratique) en fait plutôt 50. Le seuil de rentabilité (qui dépend du prix des machines et de la matière première) se situait à environ 80 tiges à l'heure en 1998.

<sup>4</sup> *Dispositif élastique:* dispositif dont le signal de sortie est proportionnel à son déplacement et qui exerce une force de retour proportionnelle à son déplacement, généralement à l'aide de ressorts.

Dans le cas des porteurs, l'important est qu'il puisse transporter les billes récoltées par l'abatteuse-façonneuse de la forêt au chemin de camionnage au fur et à mesure de la récolte.

*Aspects sociaux:* Au Canada, les opérateurs sont pratiquement tous des hommes âgés d'au moins 18 ans, qui ont un niveau de scolarité qui dépasse rarement le secondaire, mais qui détiennent souvent un diplôme d'étude professionnelle relié à la machinerie lourde. Un novice prend de 4 à 6 mois pour atteindre un niveau de productivité de 80 tiges à l'heure. Un cours non-obligatoire de 6 mois menant à un diplôme d'étude professionnelle en abattage et façonnage des bois est offert depuis 1995 par le ministère de l'Éducation du Québec, via cinq centres de formation professionnelle situés en région. La situation est similaire dans les autres provinces canadiennes.

*Aspects organisationnels:* La semaine de travail des opérateurs varie entre 40 et 60 heures à raison de 10 à 12 heures par jour, 4 jours et demi par semaine, avec des quarts de jour ou de nuit. Le travail est saisonnier, la récolte cessant entre janvier et avril à cause de la neige et du froid. Durant la semaine, les opérateurs résident généralement dans des camps forestiers situés à proximité du site de travail.

### **1.3.2.3 Conditions de travail**

Les cabines des opérateurs sont climatisées et isolées acoustiquement. Cependant, les opérateurs doivent souvent en sortir pour la réparation, l'entretien ou le dépannage de leur véhicule. Ils sont ainsi exposés à toutes sorte de conditions difficiles qui peuvent varier selon les saisons (chaleur, froid, humidité, moustiques, bruit, odeurs de carburant et d'huile). De plus, les opérateurs travaillent la plupart du temps dans l'isolement et dans des régions diverses éloignées des grands centres. Finalement, le temps supplémentaire est fréquent, dû aux bris mécaniques et aux contraintes de production.

On peut donc affirmer sans l'ombre d'un doute que les conditions de travail des opérateurs de machines forestières sont difficiles et exigeantes.

#### **1.3.2.4 Importance de la sécurité**

Comme il est interdit à quiconque de s'approcher du véhicule lors de son opération (de toute façon les visiteurs se font rares en forêt), l'opérateur se préoccupe surtout de sa sécurité personnelle et de celle de son véhicule.

Il veillera ainsi à ne pas endommager son véhicule suite à une mauvaise manœuvre lors du déplacement du véhicule ou de la manipulation de l'outil. Finalement, il respectera les consignes de sécurité usuelles concernant les déplacements à l'extérieur de la cabine d'opération et les travaux de d'entretien, de mise au point, de dépannage et de réparation du véhicule. Pour plus de détails sur les consignes de sécurité et les techniques d'opération, se référer au manuel rédigé par l'auteur [Lapointe, 1997].

#### **1.3.2.5 Conclusions**

Les principales constatations effectuées suite à l'analyse de la tâche sont les suivantes:

- plus de 50% du temps d'opération est consacré à la manipulation de l'outil;
- interface de commande peu intuitive pour la manipulation de l'outil;
- temps d'apprentissage de 4 à 6 mois pour atteindre une productivité rentable (80 tiges/h);
- planification de tâche complexe en raison de l'environnement de travail peu structuré;
- longues journées de travail (10 à 12 heures) dans l'isolement;
- exigences de production élevées pour demeurer profitable.

Il est clairement ressorti de cette analyse que la manipulation de l'outil à l'aide de l'interface de commande actuelle est difficile et demande beaucoup de pratique.

Si on pouvait simplifier la manipulation de l'outil grâce à une interface de commande plus facile à utiliser, l'opérateur pourrait se concentrer davantage sur la planification des tâches et l'opération de l'outil. Cela se traduirait par une réduction du temps d'apprentissage nécessaire à un opérateur pour devenir pleinement productif. Étant donné le coût d'opération élevé associé aux téléopérateurs<sup>5</sup>, un opérateur qui devient productif plus rapidement peut permettre des économies appréciables. De plus, un meilleur contrôle lors de la manipulation de l'outil ne peut qu'avoir des effets bénéfiques sur la sécurité des opérations, c'est-à-dire pour protéger la machine et son opérateur de bris accidentels dus à une mauvaise manipulation.

---

<sup>5</sup> En 1998, le coût d'opération d'une abatteuse-façonneuse au Québec varie entre 110\$/h et 140\$/h, incluant le salaire de l'opérateur, selon le formateur en chef du cours "abattage et façonnage des bois" du centre de formation professionnelle Mont-Laurier, un des cinq centres de formation existants pour les opérateurs d'abatteuses-façonneuses au Québec.

#### 1.4 Contexte de la recherche

Étant donné un parc de téléopérateurs forestiers à 4 ddl estimé à plus de 10 000 véhicules dans le monde<sup>6</sup>, il est pertinent de se questionner sur la qualité et l'efficacité des interfaces humain-machine utilisées pour les opérer. En effet, tous ces téléopérateurs utilisent un mode de commande articulaire en vitesse<sup>7</sup> basé sur une technologie de commande hydraulique proportionnelle pour piloter le bras manipulateur. Bien que cette technologie ait subi l'épreuve du temps dans le milieu de travail difficile de la foresterie, elle n'exploite pas les possibilités offertes aujourd'hui par l'informatique embarquée. Nous allons donc étudier ces possibilités et mesurer leur influence sur la performance humaine.

Cette thèse étudie donc les possibilités offertes par l'informatique embarquée au niveau de l'interface de commande des téléopérateurs forestiers à 4 ddl décrits précédemment, dans le but d'améliorer la performance humaine lors de leur opération. Comme l'opérateur est situé à bord du téléopérateur, il bénéficie directement de retours d'informations visuel, auditif et même haptique (sous forme des vibrations de la cabine de pilotage) avec le lieu de travail. Il n'y a donc pas d'interface de perception intermédiaire entre l'opérateur et le lieu de travail.

Cette thèse vise également à modéliser la performance humaine liée à l'utilisation de l'interface de commande actuelle des téléopérateurs forestiers à 4 ddl .

---

<sup>6</sup> Les ventes annuelles mondiales d'abatteuses-façonneuses et de porteurs dépassent les 2000 unités depuis 1994 [ Drushka, 1997]. En supposant une vie utile de 5 ans, on atteint facilement le nombre de 10 000 véhicules en opération, sans compter les chargeuses.

<sup>7</sup> *Commande articulaire en vitesse*: mode de commande où la vitesse de déplacement de chacune des articulations d'un bras manipulateur est proportionnelle au signal de commande en provenance d'un dispositif de commande continu.

Cette recherche fut financée dans le cadre du projet ATREF (Application des Technologies Robotiques aux Équipements Forestiers), un projet de recherche et développement qui visait à améliorer les équipements forestiers en utilisant les technologies robotiques. Ce projet de 2,2 millions de dollars répartis sur 4 ans (1994-1998) comportait 3 grands volets:

- 1) L'utilisation de la commande informatisée pour améliorer la commande des équipements forestiers actuels.
- 2) Le développement d'un simulateur graphique pour la formation des opérateurs de téléopérateurs forestiers.
- 3) Le développement d'outils de CAO pour accélérer la conception et l'optimisation de la structure mécanique de nouveaux téléopérateurs forestiers.

Cette thèse relève des deux premiers volets du projet ATREF, puisqu'elle touche à l'amélioration de l'interface de commande à l'aide de l'informatique embarquée, tout en utilisant le simulateur graphique comme banc d'essai pour évaluer de nouvelles interfaces de commande.

Le prochain chapitre passe en revue la littérature qui concerne les interfaces de commande dans le but de présenter l'état des connaissances dans le domaine, de préciser nos objectifs et les actions qui seront prises pour les atteindre. Cette revue de littérature permettra également de s'assurer du caractère original et pratique des travaux poursuivis dans cette thèse.

## **CHAPITRE II - REVUE DE LITTÉRATURE SUR LES INTERFACES DE COMMANDE EN TÉLÉOPÉRATION**

Comme on l'a vu au premier chapitre, l'interface de commande utilisée par les téléopérateurs forestiers actuels n'est peut-être pas optimale car elle n'exploite pas les possibilités offertes aujourd'hui par l'informatique embarquée et les dispositifs de commande à plus de 2 ddl. Il est donc important d'analyser les possibilités et les contraintes technologiques actuelles concernant les interfaces de commande en téléopération.

Ce chapitre brosse donc un tableau de l'état des connaissances qui concernent les interfaces de commande suite aux informations recueillies lors de l'analyse de la tâche et de la revue de littérature. Suite à cet exercice, les objectifs et les hypothèses de cette recherche sont raffinés et nous développons le plan d'expérimentation qui permettra d'atteindre les objectifs et de vérifier les hypothèses.

### **2.1 État des connaissances concernant les interfaces de commande en téléopération**

#### **2.1.1 Modes de commande et dispositifs d'entrée de données appropriés**

Tel que présenté au tableau 1.1, une interface de commande est définie par les modes de commande et les dispositifs de commande qu'elle utilise. Ces derniers sont caractérisés par leur type, leur nombre et leur agencement dans l'espace de travail de l'opérateur.

Les caractéristiques particulières de ces téléopérateurs et le contexte dans lequel ils sont utilisés limitent grandement les options envisageables en ce qui concerne les modes de commande qui peuvent être utilisés pour la manipulation.

De plus, la revue de littérature permet de constater qu'à chaque mode de commande correspond un type de dispositifs de commande qui est plus approprié.

Ainsi, la commande de type “tout ou rien” s’effectue généralement à l’aide de dispositifs discrets à deux états, tels que les touches, les boutons et les interrupteurs. Elle sert habituellement à actionner des fonctions de l’outil telles que l’ouverture d’une pince ou le zoom d’une caméra [Hurteau, 1994] et n’est pas recommandée pour déplacer un bras manipulateur.

La commande articulaire, qu’elle soit en position ou en vitesse, réfère aux cas où l’opérateur commande directement la position ou la vitesse de déplacement de chacune des articulations du bras manipulateur. Au point de vue technique, c’est le type de commande qui est le plus simple à implémenter, car il ne nécessite pas un modèle cinématique du bras manipulateur et que chacune des articulations est commandée de façon indépendante. Du point de vue de l’opérateur cependant, il exige un certain apprentissage, car les mouvements articulaires ne correspondent pas à des mouvements linéaires de l’outil<sup>8</sup>. L’opérateur doit donc développer un modèle mental de la cinématique inverse du bras manipulateur.

La commande coordonnée, qu’elle soit en position ou en vitesse, réfère quant à elle aux cas où l’opérateur commande directement la position ou la vitesse de déplacement de l’outil situé à l’extrémité du bras manipulateur. Dans ce cas, c’est un ordinateur qui effectue les calculs nécessaires pour déterminer la position ou la vitesse de déplacement des différentes articulations du bras manipulateur. Ces calculs sont effectués à l’aide d’un modèle cinématique inverse du bras manipulateur.

La commande en position réfère aux cas où l’opérateur spécifie directement la position d’une ou plusieurs articulation du bras manipulateur (on parle alors de commande articulaire en position) ou encore d’un référentiel fixé à son outil ou organe terminal (on parle alors de commande coordonnée en position). Un bon exemple de commande en position est le

---

<sup>8</sup> Sauf dans les cas de manipulateurs cartésiens, qui sont plutôt rares, voire absents en téléopération et qui ne sont de toute façon pas étudiés dans cette thèse.

déplacement d'un curseur à l'écran à l'aide de la souris car le déplacement de la souris est directement relié à la position du curseur et non pas à sa vitesse de déplacement.

De la même manière, la commande en vitesse réfère aux cas où l'opérateur spécifie directement la vitesse d'une ou plusieurs articulation du bras manipulateur (on parle alors de commande articulaire en vitesse) ou encore d'un référentiel fixé à son outil ou organe terminal (on parle alors de commande coordonnée en vitesse). Un bon exemple de commande en vitesse (commande articulaire en vitesse pour être plus précis) est l'opération d'une excavatrice où la défexion d'une manette de commande est directement reliée à la vitesse de déplacement de l'articulation commandée. Autrement dit, plus on pousse (ou tire) sur la manette, plus l'articulation se déplace rapidement.

La commande en position, pour être efficace, requiert des dispositifs isotoniques<sup>9</sup> [Zhai, 1993a], tels que les souris 2D et 3D, les gants sensoriels et les bras maîtres-esclaves. De plus, le bras manipulateur doit être en mesure d'exécuter en temps réel la commande en position indiquée par l'opérateur. Pour cette raison et pour des raisons de précision, la commande en position n'est pas recommandée pour opérer des bras manipulateurs d'envergure supérieure au bras humain ou qui se déplacent lentement [Kim, 1987; Stark, 1987; Sheridan, 1992], comme c'est le cas pour le bras spatial canadien. Les dispositifs de commande isotoniques 3D sont également reconnus pour être plus fatigants à opérer que les dispositifs isométriques<sup>10</sup> ou élastiques, en raison de leur grand volume de travail et du fait que les mouvements de la main ne sont pas supportés [Zhai, 1993c]. La commande en position est donc recommandée pour les manipulations rapides et de courte durée.

---

<sup>9</sup> *Dispositif isotonique*: dispositif dont le signal de sortie est proportionnel à son déplacement, qui s'effectue librement, sans effort.

<sup>10</sup> *Dispositif isométrique*: dispositif fixe, dont le signal de sortie est proportionnel à la force qui lui est appliquée.

Or, la lenteur de déplacement des bras manipulateurs et les longs quarts de travail (8 à 12 heures par jour) rencontrés en foresterie [Lapointe, 1995] rendent ce mode de commande incompatible avec la nature du travail rencontré en téléopération forestière.

La commande en vitesse, pour sa part, est effectuée plus efficacement avec les dispositifs élastiques ou isométriques, qui possèdent une capacité inhérente d'auto-centrage [Zhai, 1993]. Le seul avantage des dispositifs isométriques sur les dispositifs élastiques est qu'ils ne demandent qu'un petit espace de travail, puisqu'ils ne bougent pas. Ils sont cependant plus sensibles aux vibrations et ne fournissent pas de retour d'information kinesthésique<sup>11</sup> [Landis, 1985; Zhai, 1993c]. De plus, pour des tâches de manipulation 3D, la performance initiale des dispositifs de commande élastiques est supérieure à celle des dispositifs de commande isométriques. La différence tend cependant à s'atténuer au fur et à mesure que l'opérateur prend de l'expérience, ce qui laisse supposer une évolution de type commande en boucle fermée vers une commande en boucle ouverte [Crossman, 1974; Moray, 1986; Zhai, 1993c].

Finalement, la commande supervisée [Sheridan, 1992] est un mode de commande avancé où l'opérateur supervise continuellement le travail du téléopérateur, mais n'intervient que sporadiquement pour lui donner des instructions de haut niveau du genre "dépose cela à cet endroit" ("Put that there") [Cannon, 1990]. Malgré les avantages évidents de la commande supervisée, celle-ci n'est pour l'instant efficace qu'en environnement contrôlé. Elle n'est donc pas applicable ici en raison des environnements peu structurés rencontrés en forêt.

Suite à ce premier débroussaillage, il est clair que nos recherches doivent s'orienter vers les modes de commande en vitesse opérés à l'aide de dispositifs de commande continus de type élastiques.

---

<sup>11</sup> *Kinesthésique*: qui se rapporte à la perception du mouvement d'un membre ou d'une articulation.

### 2.1.2 Revue des modes de commande en vitesse

En se référant au tableau 1.1, on constate que la commande en vitesse peut être de type articulaire ou coordonné. On a également vu que les téléopérateurs forestiers actuels utilisent la commande en vitesse de type articulaire pour opérer le bras manipulateur.

Ce mode de commande ne requiert pour fonctionner que des composantes de commande hydraulique proportionnelle classiques. Bien que basé sur une technologie robuste et éprouvée, ce mode de commande est peu intuitif, car pour déplacer l'outil dans une certaine direction, l'opérateur doit coordonner simultanément le déplacement de plusieurs articulations. Cela exige de la part de l'opérateur la construction d'un modèle mental de la cinématique inverse<sup>12</sup> du bras manipulateur, ce qui requiert un certain temps d'apprentissage.

L'ajout de capteurs de position aux articulations du bras manipulateur et l'utilisation de l'informatique embarquée, permettent de recourir à la commande coordonnée en vitesse [Whitney, 1969; Lawrence, 1993]. Ce mode de commande permet de piloter l'outil de façon plus intuitive en spécifiant directement la direction et la magnitude de sa vitesse de déplacement à l'aide de l'interface de commande matérielle.

Ce mode de commande simplifie également la tâche de l'opérateur et réduit son temps d'apprentissage [Lawrence, 1993] car c'est l'ordinateur qui, muni d'un modèle cinématique inverse du bras manipulateur, effectue en temps réel les calculs requis pour coordonner le déplacement des différentes articulations.

Il existe cependant un grand nombre de possibilités concernant la définition des axes de

---

<sup>12</sup> *Modèle cinématique inverse*: modèle qui permet de déterminer les positions et les vitesses articulaires d'un bras manipulateur à partir de la position, de l'orientation et de la vitesse de déplacement de son outil terminal.

déplacement de l'outil en commande coordonnée en vitesse. Heureusement, certaines lignes directrices ergonomiques nous permettent d'identifier les meilleurs candidats pour notre évaluation.

Ainsi, on sait que la compatibilité<sup>13</sup> d'une interface avec la tâche est un critère très importants à respecter pour assurer une bonne performance ainsi qu'un apprentissage rapide et intuitif [Wickens, 1992]. La question qui se pose est donc de savoir quel type d'isomorphisme donne les meilleures performances. Ainsi est-ce que le mouvement d'une manette de commande doit être orienté par rapport au système de référence fixé à la tête de l'opérateur ou encore par rapport à celui fixé à son corps ou bien par rapport au système de référence global (dans le cas où l'opérateur se déplace relativement à celui-ci comme c'est le cas dans une excavatrice)?

Worringham [1989] a étudié la question et étant donné la position des dispositifs de commande retrouvés dans les téléopérateurs forestiers actuels, il n'existe vraiment que deux types de compatibilité commande/réponse plausibles pour la commande coordonnée<sup>14</sup>. Il s'agit de la compatibilité commande-réponse et la compatibilité visuo-motrice qui en fait correspondent respectivement à des référentiels cartésien et cylindrique.

Maintenant, comme les vitesses articulaires ne peuvent dépasser les limites permises par les capacités physiques du téléopérateur, alors pour chacun de ces référentiels, deux possibilités s'offrent à nous en ce qui concerne la relation entre le signal de commande en vitesse (rélié au déplacement du dispositif de commande) et la vitesse absolue de l'axe commandé.

---

<sup>13</sup> *Compatibilité*: réfère à l'accord pouvant exister entre les caractéristiques de l'utilisateur (mémoire, perceptions, habitudes, etc.) et l'organisation des sorties, des entrées et du dialogue [Bastien, 1991; Scapin, 1997].

<sup>14</sup> Les modes de commande utilisant un référentiel outil ont été écartés de cette recherche en raison de leur nature incompatible avec les tâches réalisées en foresterie. Ces modes permettent le déplacement de l'outil relativement aux axes de son propre référentiel plutôt qu'à celui normalement fixé à la base du bras manipulateur.

Ainsi, on peut faire en sorte que la vitesse maximale permise dans un référentiel soit la même peu importe la position dans le volume de travail. Dans ce cas, cette vitesse maximale est égale à la plus petite des vitesses référentielles maximales permises (i.e. qui respecte les vitesses articulaires limites) dans tout le volume de travail. On désignera cette première alternative sous le nom de *relation signal/vitesse uniforme*. En termes mathématiques, on peut dire que la vitesse uniforme maximale, notée  $\max(V_{\text{uniforme}})$  est donnée par:

$$\max(V_{\text{uniforme}}) = \min(V_{\text{max}}|_{V_t})$$

où  $V_{\text{max}}|_{V_t}$  représente l'ensemble des vitesses maximales pouvant être atteintes en chacun des points du volume de travail du bras manipulateur.

L'autre possibilité est de s'arranger pour que la vitesse maximale permise dans un référentiel soit la plus grande possible étant donné la configuration particulière du bras manipulateur (i.e. sa position dans l'espace de travail). Nous désignerons cette seconde alternative sous le nom de *relation signal/vitesse optimum*. En termes mathématiques, la vitesse optimum maximale, notée  $\max(V_{\text{optimum}})$  pour une certaine configuration  $\Theta$  est donnée par:

$$\max(V_{\text{optimum}}) = V_{\text{max}}|_{\Theta}$$

Cette relation signal/vitesse est plus conforme au point de vue ergonomique selon lequel la performance en téléopération doit être limitée par les capacités physiques du téléopérateur plutôt que par les capacités de l'opérateur ou de l'interface humain-machine qui les relie.

C'est donc cette alternative qui sera étudiée et qui définit les modes de commande coordonnée en vitesse cartésienne et cylindrique illustrés à la figure 2.1.

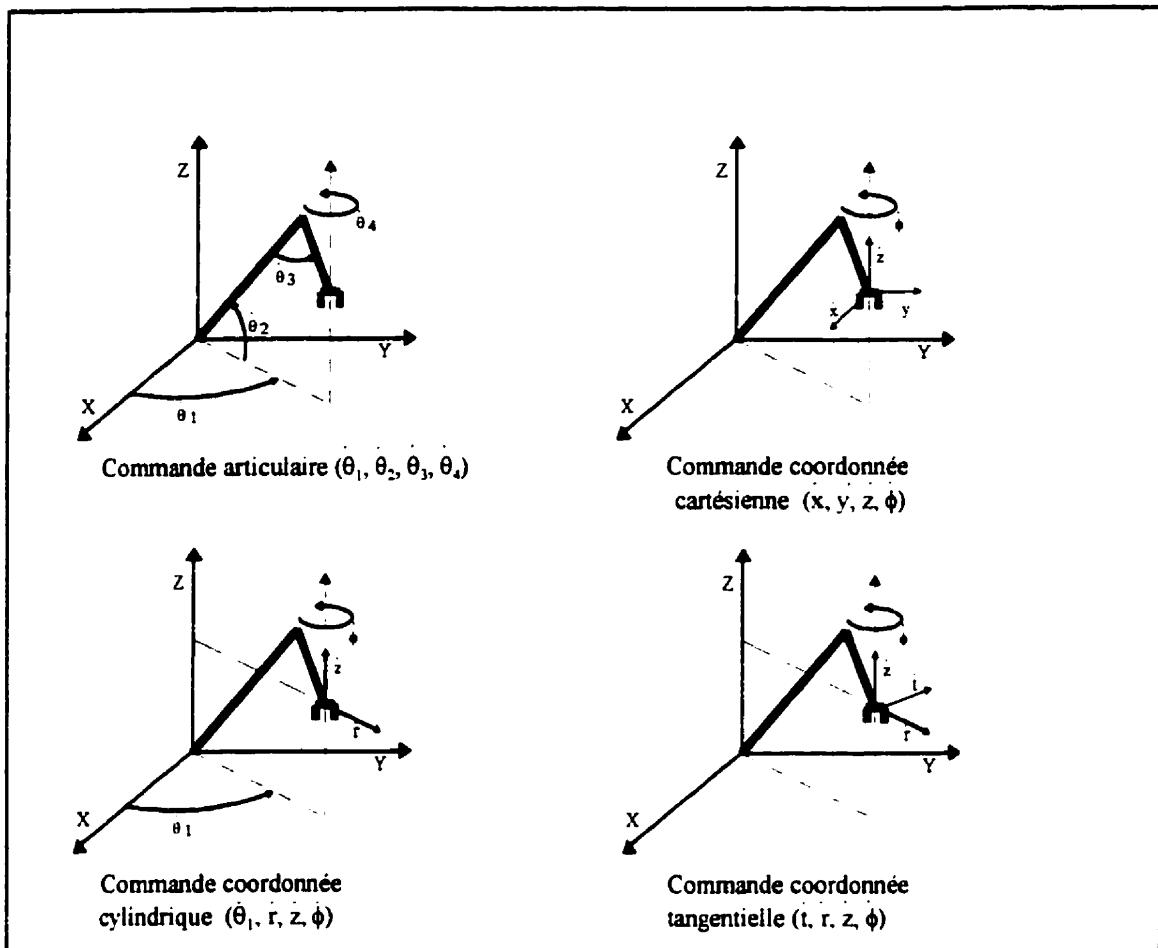


Figure 2.1 Différents modes de commande en vitesse

Par contre, comme les études précédentes effectuées par Lawrence [1993] sur la commande coordonnée en vitesse portaient sur un référentiel cylindrique mais avec une relation signal/vitesse uniforme, il sera intéressant de comparer cette option avec les deux autres précédentes. Cette comparaison permettra peut-être de valider l'affirmation faite à la section 1.2, à savoir que la performance ne doit pas être limitée par l'interface humain-machine, mais plutôt par les capacités physiques du téléopérateur.

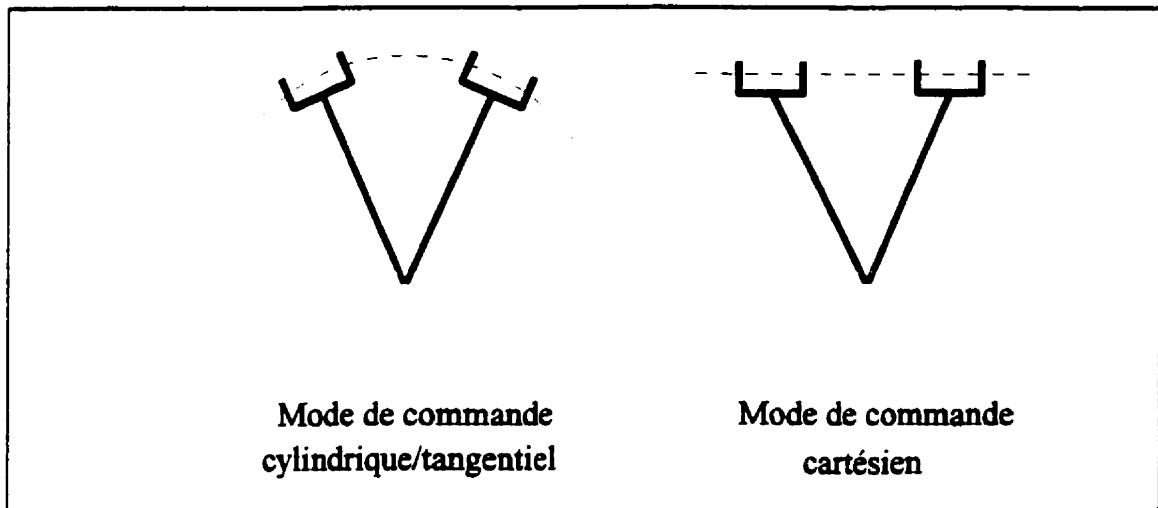
Pour différencier la commande coordonnée en vitesse de Lawrence des deux autres, nous l'appellerons commande coordonnée tangentielle<sup>15</sup>.

Ainsi, en mode cartésien, l'opérateur commande les vitesses de déplacement et d'orientation de l'outil selon un référentiel cartésien absolu, fixé à la base mobile du téléopérateur. Quant au mode cylindrique, les déplacements se font selon un système de coordonnées cylindrique situé à la base du bras manipulateur et l'opérateur commande les vitesses de déplacement angulaire, radiale et verticale de l'outil, ainsi que sa vitesse de rotation relative à l'extrémité du bras. Finalement, en mode tangentiel tout est identique au mode cylindrique, sauf que la vitesse maximale reliée aux déplacements angulaires de l'outil doit être uniforme dans tout l'espace de travail, ce qui revient à dire que l'opérateur commande la vitesse de déplacement tangentielle à l'arc de cercle formé par la rotation du bras manipulateur autour de l'axe vertical, d'où le qualificatif tangentiel.

Il est important de comprendre les répercussions de ce choix de référentiels par rapport aux mouvements d'orientation de la tête. Ainsi, suite à une rotation du manipulateur autour de sa base, l'orientation de la tête ne sera pas la même, selon que l'on se trouve en mode de commande cartésien ou cylindrique/tangential, tel qu'illustré à la figure 2.2.

---

<sup>15</sup> Pour alléger le texte, les quatre modes de commande en vitesse illustrés à la figure 2.1 ne seront dorénavant identifiés que par leurs qualificatifs, à savoir: articulaire, cartésien, cylindrique et tangentiel. Les allusions à d'autres modes de commande que ceux-ci seront précisées pour éviter toute confusion.



**Figure 2.2** Orientation de la tête vs mode de commande suite à une rotation de la base

Malgré ces différentes possibilités de correspondances commande/réponse, aucune étude n'a tenté jusqu'à date d'établir laquelle était la plus compatible avec les attentes de l'opérateur ou donnait les meilleures performances. En fait, on ne retrouve dans la littérature que des exemples d'utilisation séparés de chacun des trois modes de commande coordonnée énumérés, soit les modes cartésien [Stark, 1987a, 1987b], cylindrique [Greenspan, 1995, 1997] et tangentiel [Lawrence, 1993]. Ce point mérite donc d'être étudié en détail.

### 2.1.3 État des connaissances sur l'interface de commande matérielle

L'interface matérielle utilisée mérite également une étude approfondie car l'utilisation de l'informatique embarquée combinée à des dispositifs de commande élastiques à plus de 2 ddl tels que les palonniers, offre des possibilités qui ont été peu explorées.

En fait, sur la base d'une revue de la littérature, nous avons constaté que les interfaces de commande à 1 ddl et 2 ddl ont fait l'objet de nombreuses études [Card, 1978; Sanders, 1992; Wickens, 1992]. Plusieurs personnes se sont également penchées sur le problème à 3 ddl [Poulton, 1974; Massimino, 1989a; Ware, 1993;] et même 6 ddl, notamment pour des applications telles que la commande du bras spatial canadien [Nguyen, 1994] ou les

interactions en environnement virtuel [Ware, 1988; Massimino, 1989a; Zhai 1993a, 1993b, 1993c; Bordegoni, 1994].

Cependant, peu de chercheurs se sont attardés à étudier les interfaces de commande matérielles à 4 ddl dans un contexte de téléopération. Le peu d'études reliées à ces interfaces de commande est probablement lié au fait que plusieurs ont pensé que la résolution du problème général à 6 ddl pourrait par la suite s'appliquer aux cas où moins de ddl sont nécessaires, par exemple 4 ou 5 ddl. Cependant, Massimino [1989a] a démontré que pour une tâche de poursuite, l'erreur associée à chacun des degrés de liberté commandés augmente avec le nombre de ddl simultanément commandés. Il semble donc préférable, par exemple, de commander un bras à 4 ddl avec une interface à 4 ddl plutôt qu'avec une interface à 6 ddl.

Les recherches effectuées sur des interfaces à 2 ddl démontrent que l'intégration des commandes est bénéfique lorsque les différents axes commandés ont des dynamiques semblables [Chernikoff, 1963; Baty, 1971; Fracker, 1989] et qu'il y a similitude entre la configuration des commandes et la tâche à accomplir, car cela diminue la charge mentale de travail [Wickens, 1992]. C'est aussi l'avis de plusieurs chercheurs en ce qui concerne les interfaces 3D [McAvinney, 1990; Felger, 1992; Jacob, 1992]. Cependant, la plupart de ces recherches portent sur des interfaces à 2 ddl et ne permettent pas d'affirmer de façon claire que l'intégration des commandes est bénéfique pour les interfaces à 4 ddl, même lorsque tous les axes possèdent des dynamiques semblables et qu'il y a similitude entre la configuration des commandes et la tâche à accomplir.

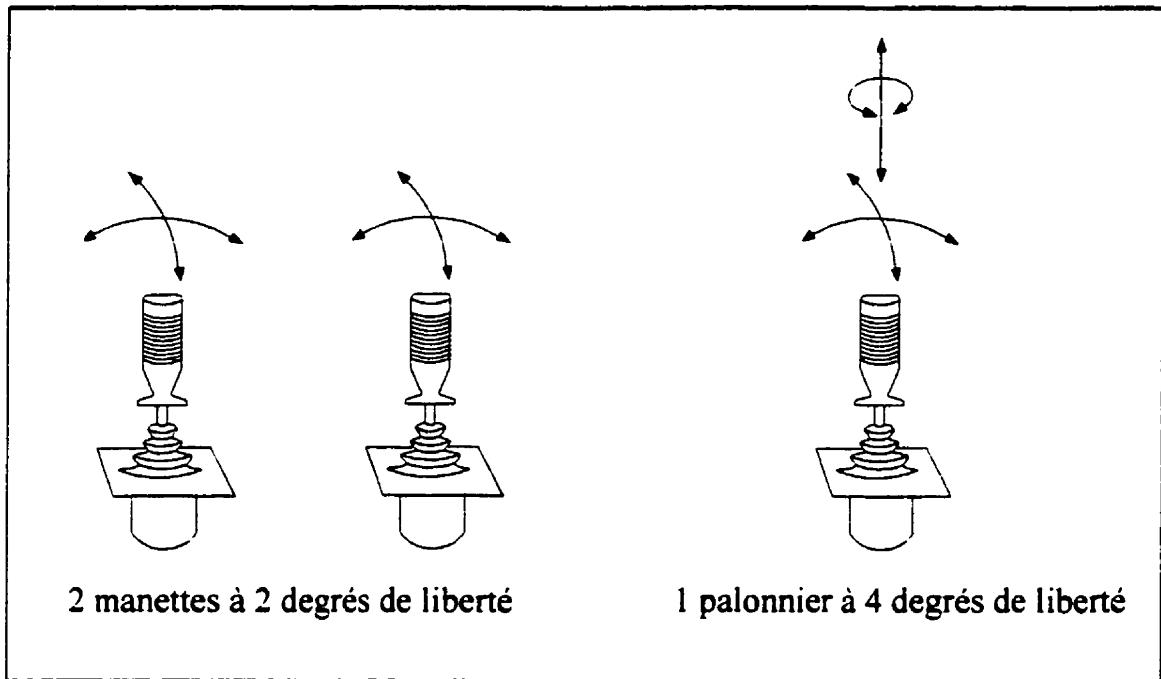
Suite à la revue de littérature, seules trois études touchant les interfaces de commande à 4 ddl ont été répertoriées, dont deux concernant le pilotage d'hélicoptères [Sinclair, 1981; Aiken, 1986] et l'opération de véhicules de type excavatrice [Lawrence, 1993].

Les deux premières études démontrent qu'il y a avantage à intégrer plus d'un ddl sur une même manette, mais que le degré de stabilité et de contrôle du système commandé doit lui aussi augmenter pour pouvoir retirer tous les bénéfices de l'intégration. Ainsi, lorsqu'on intègre 4 ddl sur une seule manette, il est difficile d'agir séparément sur un ou plusieurs axes simultanément sans du même coup agir de façon accidentelle sur les autres, un phénomène que l'on appelle couplage. Le couplage est particulièrement accentué lorsque le dispositif permet un mouvement vertical de la poignée. On peut donc diminuer le problème en utilisant un dispositif à 3 ddl dont 2 en translation (x,y) et 1 en rotation (mouvement de lacet).

L'étude de Lawrence sur les véhicules de type excavatrice montre une diminution marquée du temps d'apprentissage et un maintien du niveau de performance (temps d'exécution) lors de l'utilisation d'un dispositif de commande à 4 ddl avec la commande coordonnée tangentielle comparativement à deux manettes à 2 ddl en mode articulaire (voir figure 2.3). Cependant, on ne sait pas si l'avantage est lié à l'utilisation de la commande coordonnée, à l'utilisation d'une interface matérielle différente ou aux deux. C'est un point que nous allons éclaircir aux chapitres suivants.

Nous allons ainsi vérifier s'il est préférable d'utiliser une interface matérielle constituée de deux manettes à 2 ddl (interface conventionnelle) pour mieux répartir la charge de travail ou plutôt d'un seul dispositif à 4 ddl, appelé palonnier, qui est compatible avec la tâche (car les mouvements du palonnier sont effectués dans la direction de déplacement désirée, figure 2.3).

D'autres paramètres de l'interface de commande matérielle sont également susceptibles d'affecter la performance. Ces paramètres sont: l'étendue de mouvement des axes des manettes ou du palonnier, la rigidité de ressorts de rappel et la position de ces dispositifs de commande par rapport à l'opérateur.



**Figure 2.3** Interfaces matérielles étudiées

Comme on le verra au prochain chapitre, ces variables ont déjà fait l'objet de nombreuses études et seront par conséquent contrôlées afin de maximiser la performance.

#### 2.1.4 Revue des différentes fonctions de gain

En plus de la commande coordonnée et des différents schèmes de correspondance commande/réponse, l'informatique embarquée permet d'utiliser toute une variété de fonctions de gain des axes commandés.

Les téléopérateurs forestiers conventionnels utilisent tous une fonction de gain linéaire (gain fixe) pour la commande de leur bras manipulateur. Par conséquent, la vitesse de déplacement d'une articulation est proportionnelle au déplacement de la manette de commande selon l'axe associé à l'articulation. Il serait intéressant de vérifier l'efficacité d'une fonction de gain non-linéaire pour la commande de leur bras manipulateur.

L'idée d'utiliser une fonction de gain variable plutôt que fixe n'est pas nouvelle, puisqu'elle est déjà utilisée en informatique pour des tâches de pointage à l'aide de souris ou tablettes graphiques [Becker, 1986]. Cependant, ces dispositifs de commande sont utilisés pour la commande en position et aucune étude ne semble avoir été faite sur l'utilisation de cette technique pour la commande en vitesse de bras manipulateurs.

Nous savons que le temps d'exécution d'une tâche de manipulation est fonction du gain utilisé et de l'étendue de mouvement du dispositif de commande [Arnaut, 1990]. Ainsi, pour une étendue de mouvement donnée, la relation entre le temps d'exécution et le logarithme du gain utilisé forme généralement une courbe en "U" [Jenkins, 1949; Gibbs, 1962; Stark, 1987; Zhai, 1993a], tel qu'illustré à la figure 2.4.

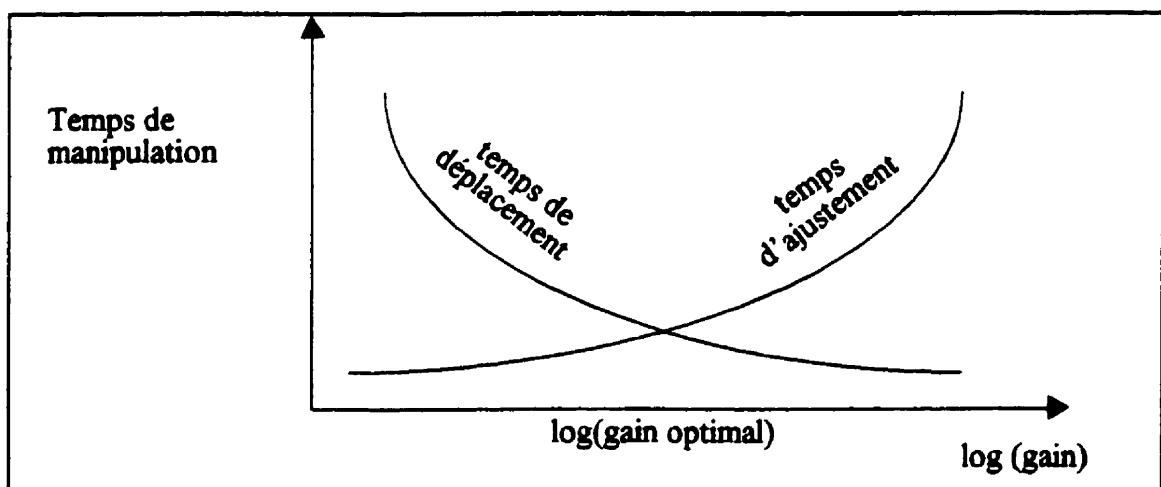


Figure 2.4 Temps de manipulation en fonction du gain

Cette relation s'explique par le fait qu'un gain trop faible demande un temps de déplacement (positionnement grossier) excessivement long, tandis qu'à l'inverse un gain trop élevé exige un temps d'ajustement (positionnement fin) qui est plus long.

En ce qui concerne la commande articulaire, le gain fixe optimal est celui qui fait correspondre le signal de commande maximal d'un dispositif de commande à la vitesse

maximale de déplacement de l'articulation commandée. On obtient alors une plage dynamique maximale. Si on généralise cette notion à la commande coordonnée, alors le gain fixe optimal est celui qui fait correspondre le signal de commande maximal du dispositif de commande ( $S_{max}$ ) à la vitesse de déplacement maximale permise pour l'axe commandé, dans tout le volume de travail, notée  $\max(V_{max}|_{v.t.})$ . La vitesse maximale permise dépend du type de relation signal/vitesse utilisé qui peut être uniforme ou optimum, tel qu'expliqué précédemment à la section 2.1.2. Le tout est illustré à la figure 2.5 où  $V_{max}|_{\Theta}$  correspond à la vitesse maximale de l'axe commandé, lorsque le bras manipulateur est dans une certaine configuration  $\Theta$ .

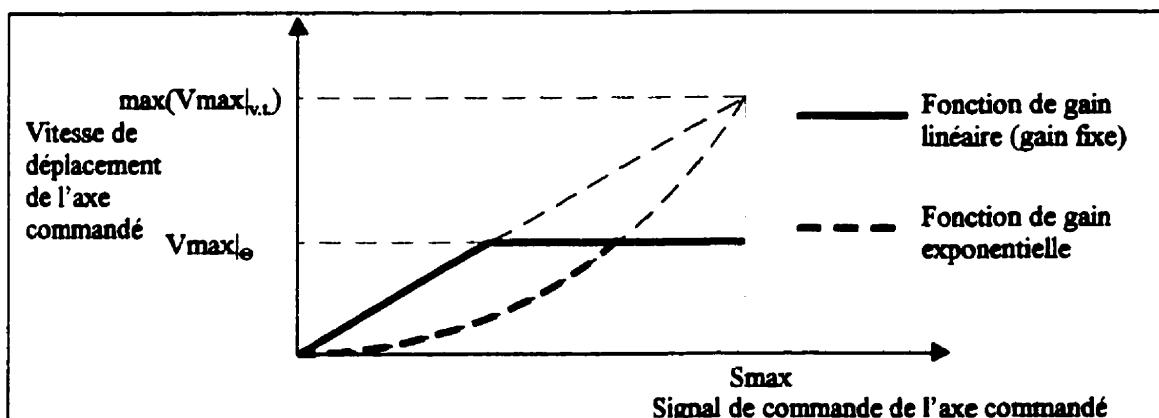


Figure 2.5 Fonctions de gain pour la commande en vitesse

À notre avis, il est possible d'améliorer la performance en utilisant un gain variable plutôt qu'un gain fixe. Ainsi, le gain serait petit lorsque l'opérateur déplace l'outil à faible vitesse pour permettre un positionnement fin et le gain serait plus grand lorsque l'opérateur déplace l'outil sur de grandes distances. Pour y arriver, nous proposons d'utiliser une fonction de gain de forme exponentielle telle qu'illustrée à la figure 2.5. Une telle fonction de gain devrait réduire le temps de manipulation grâce à une meilleure précision à basse vitesse, tout en permettant d'atteindre la vitesse maximale. Cet effet devrait être d'autant plus marqué, que l'étendue de mouvement du dispositif de commande est limitée et que la vitesse de déplacement du bras manipulateur est élevée.

Finalement, dans le cas d'une relation signal/vitesse optimum, une fonction de gain exponentielle permet d'utiliser une plus grande plage dynamique du dispositif de commande (c'est-à-dire, dans notre cas un plus grand déplacement de la manette ou du palonnier) lorsque la vitesse maximale dans une certaine configuration  $V_{max}|_0$  est inférieure à la vitesse maximale permise dans tout le volume de travail  $\max(V_{max}|_{v.t.})$ .

### 2.1.5 Autres facteurs importants

Cela complète donc l'état des connaissances concernant les interfaces de commande en téléopération. D'autres facteurs reliés à la tâche, à l'opérateur lui-même, au téléopérateur et à l'interface de perception peuvent également affecter la performance des opérateurs. Cependant, comme ils ne relèvent pas de l'interface de commande, ils serviront plutôt de variables de contrôle lors des essais expérimentaux. Ces facteurs sont vus plus en détail au prochain chapitre qui traite du plan d'expérimentation.

Nous sommes donc en mesure maintenant de définir plus précisément les objectifs et les hypothèses de cette recherche.

## 2.2 Objectifs

Tel que nous l'avons expliqué précédemment, cette recherche s'intéresse aux interfaces de commande des téléopérateurs forestiers à 4 ddl et à l'impact sur la performance humaine et la satisfaction de l'opérateur des nouvelles possibilités offertes par l'informatique embarquée et les dispositifs de commande élastiques à plus de 2 ddl tels que les palonniers.

Plus particulièrement, ce projet de recherche vise à accroître les connaissances sur le sujet dans le but d'aider les concepteurs d'interfaces de commande pour les téléopérateurs forestiers à concevoir des interfaces de qualité, c'est-à-dire utiles, performantes, sécuritaires, faciles à apprendre et à utiliser. Les résultats de cette recherche devraient permettre de

réduire le temps d'apprentissage et donc rendre productifs plus rapidement les opérateurs de ces machines. Bien sûr, il s'agit d'une étude exploratoire, et les caractéristiques concernant la fiabilité, la robustesse et la durée de vie de l'interface ne seront pas étudiées ici, bien que ces dernières soient loin d'être négligeables dans le contexte forestier, surtout en présence de composants électroniques [Saposnik, 1990].

Pour atteindre cet objectif, nous allons modéliser la performance humaine liée à l'utilisation initiale et à l'apprentissage des interfaces de commande à 4 ddl pour les téléopérateurs forestiers. Nous allons également étudier la satisfaction des opérateurs vis-à-vis des différentes interfaces de commande étudiées.

Ce modèle de performance sera construit à partir des informations tirées de la revue de littérature et des résultats expérimentaux qui permettront de compléter et éventuellement solidifier le cadre théorique.

Les expériences qui fourniront ces résultats ont donc pour but d'identifier et de comprendre les facteurs qui affectent la performance humaine dans les tâches de téléopération forestière. Elles permettront également de modéliser les niveaux de performance humaine qui peuvent être atteints initialement à l'aide des interfaces de commande ainsi que l'évolution de la performance dans le temps lors de l'apprentissage.

Comme spécifié auparavant, ces expériences visent à comparer différentes interfaces de commande sur le plan de la performance humaine et de la satisfaction de l'opérateur lors de tâches de téléopération forestière à l'aide d'un bras manipulateur à 4 ddl.

Les tâches de téléopération forestière qui seront utilisées lors des expériences sont des tâches de manipulation (positionnement et orientation) de l'outil, des tâches de saisie plus précisément, car tel que spécifié précédemment (section 1.3.2.2), la manipulation de l'outil occupe plus de la moitié du temps de travail des téléopérateurs forestiers à 4 ddl,

principalement pour la saisie des arbres et des billes de bois.

Nous comparerons ainsi différents modes de commande en vitesse, combinés à différentes fonctions de gain et à différentes interfaces matérielles (dispositifs de commande). Une seconde série d'expériences aura pour but d'étudier l'évolution de la performance lors de la phase d'apprentissage des opérateurs. Finalement, une troisième série d'expériences visera à étudier l'effet d'autres facteurs importants qui pourraient affecter la performance, tel que le rapport de taille entre la cible et l'outil de saisie (la pince), de manière à pouvoir en tenir compte lors de la modélisation.

Pour obtenir une optimisation complète de la performance humaine, il faudrait également optimiser les tâches de planification et d'opération de l'outil. Or la planification des tâches et l'opération des outils varient d'un type de téléopérateur à l'autre (ainsi, une abatteuse-façonneuse n'utilise pas les mêmes outils et n'effectue pas la même tâche qu'un porteur ou une chargeuse). Une étude aussi approfondie dépasse le cadre de notre recherche, qui se veut plus générale en visant tout téléopérateur forestier, fixe ou mobile<sup>16</sup>, qui possède un bras manipulateur à 4 degrés de liberté, dont trois servent à positionner l'outil dans l'espace de travail et l'autre, à l'orienter dans le plan horizontal<sup>17</sup>. Le point de vue (direct ou indirect) de l'opérateur sur l'aire de travail doit cependant être situé juste derrière ou à côté du bras manipulateur. Les principaux téléopérateurs de ce type sont les abatteuses-façonneuses, les porteurs et les chargeuses. Finalement, nous considérons que les délais de transmission sont négligeables.

---

<sup>16</sup> À l'exception de certaines chargeuses fixes situées aux usines de transformation du bois, les téléopérateurs utilisés en foresterie sont tous munis d'une base mobile, mais celle-ci ne sert habituellement qu'à atteindre le site d'opération et reste généralement stationnaire durant le pilotage du bras manipulateur et l'opération de l'outil.

<sup>17</sup> Et ce, peu importe la structure mécanique (géométrie) du bras manipulateur, car la commande coordonnée permet de faire abstraction de sa configuration.

## 2.3 Originalité et intérêt de la recherche

L'intérêt de concevoir des interfaces de commande de qualité est évident. En effet, il est facile d'imaginer l'impact qu'aurait une interface de commande qui réduirait la période d'apprentissage d'un opérateur et donc rendrait celui-ci productif plus rapidement. Vu un parc de téléopérateurs (du type étudié ici) de l'ordre de  $10^4$  véhicules dans le monde, un fournisseur capable d'offrir un véhicule plus facile d'utilisation aurait un pas d'avance sur ses compétiteurs, si ces améliorations ne sont pas trop coûteuses. Une telle amélioration offrirait donc un avantage certain dans un marché des plus intéressants.

### 2.3.1 Définition de la performance humaine

Quant à la performance humaine en téléopération forestière, il est important de la définir avant d'en discuter plus avant. Ainsi, la performance humaine en téléopération est généralement caractérisée par le temps d'exécution (aussi appelé temps de mouvement) de tâches typiques et la qualité d'exécution des celles-ci, généralement sous forme d'un critère mixte précision/taux d'erreur [Vertut, 1985; Sheridan, 1995]. Nous utiliserons à notre tour le temps de mouvement, le taux d'erreur et la précision d'exécution comme critères d'évaluation de la performance. Ceux-ci sont détaillés au prochain chapitre (section 3.3.2).

Pour ce qui est du temps de mouvement et de la précision d'une tâche, il existe déjà un modèle de performance pour les tâches de pointage. Il s'agit de la loi de Fitts [Fitts, 1954; MacKenzie, 1992a] qui a fait ses preuves, du moins pour le pointage (positionnement) à 1 ddl, 2 ddl [MacKenzie, 1992b] et 3 ddl [Cannon, 1990; MacKenzie, 1992c; Ware, 1993, 1994]. Cette loi qui permet de prédire le temps requis pour pointer une cible connaît plusieurs variantes, dont une des plus utilisée est la variante de Shannon [ MacKenzie, 1992a; Ware, 1994; Accot, 1997] qui s'énonce ainsi:

Temps de mouvement =  $C_1 + C_2 \log_2 (D/W + 1)$  où

$C_1$  et  $C_2$  sont des constantes déterminées expérimentalement

$C_1$  représente la somme du temps de réaction et de confirmation de l'acquisition de cible

$C_2$  est une constante dont l'inverse ( $1/C_2$ ) est appelé indice de performance

D représente la distance de la cible à atteindre

W représente la taille de la cible à atteindre

N.B. Pour de plus amples détails, sur la loi de Fitts, consulter l'annexe 1.

Cependant, à notre connaissance, il n'existe pas de modèle mathématique qui permette de prédire la performance humaine lors de la manipulation à 4 ddl (dont 3 pour le positionnement et 1 pour l'orientation) et encore moins pour une tâche de saisie.

En effet, la tâche de saisie ajoute un élément nouveau qui n'existe pas dans la tâche de pointage, à savoir la collision entre la cible et le pointeur. Ainsi dans les tâches de pointage, soit le pointeur, soit la cible n'est qu'un point et n'entre pas en contact avec l'autre. Or, dans une tâche de saisie, ni l'outil ni la cible ne sont ponctuels et tous deux possèdent donc des dimensions physiques mesurables. Nous croyons que le rapport entre ces deux dimensions influence la performance et nous en mesurerons l'effet dans la dernière série d'essais.

La seule chose que nous sommes en mesure de connaître concernant la performance en téléopération est le temps de mouvement minimal possible lorsqu'on utilise le téléopérateur à la limite de ses capacités physiques. En effet, le temps de mouvement minimal peut être approximé<sup>18</sup> à l'aide de la formule suivante:

---

<sup>18</sup> Cette formule ne tient pas compte du temps d'accélération des articulations, ni des obstacles éventuels qui peuvent obstruer la trajectoire en ligne directe (dans l'espace articulaire) entre la position initiale du bras manipulateur et celle de la cible. Finalement, elle suppose des vitesses articulaires maximales constantes.

$$\min (\text{Temps de mouvement}) = \max (\Delta\theta_i / V_{\max i}) \quad i = 1 \dots 4 \quad \text{où}$$

$\Delta\theta_i$  = distance entre les positions initiale et de saisie pour la  $i$ ème articulation

$V_{\max i}$  = vitesse maximale de la  $i$ ème articulation du bras manipulateur

Nous tenterons donc de modéliser la performance humaine lors de tâches de saisie à 4 ddl en s'inspirant si possible de la loi de Fitts à laquelle nous tenterons d'incorporer le concept d'orientation dans l'espace 3D (dans un plan horizontal). Finalement, nous incorporerons à notre modèle des éléments de la loi de la pratique qui permet de prédire le temps de mouvement d'une tâche simple en fonction du nombre de répétitions [Snoddy, 1926; De Jong, 1957; Card, 1978; Newell, 1981; Card, 1983]. Cette loi s'énonce ainsi:

$$T_n = T_1 n^\alpha \quad \text{où}$$

$\alpha$  est appelé coefficient d'apprentissage et varie généralement entre 0,2 et 0,6.

$T_1$  est le temps nécessaire pour exécuter la tâche la première fois.

$T_n$  représente le temps nécessaire pour compléter la tâche à la  $n$ ième pratique.

N.B. Pour plus de détails sur la loi de la pratique, consulter l'annexe 2.

L'intérêt de tenir compte de l'apprentissage est assez évident, à la lumière des résultats obtenus précédemment [Harstela, 1981; Wallersteiner, 1988, 1993], qui montrent l'influence importante de l'apprentissage sur la performance obtenue. Comme la loi de Fitts ne tient pas compte de l'apprentissage, l'inclusion de ce facteur devrait apporter un raffinement important à notre modèle de performance.

### 2.3.2 Intérêt d'un modèle de performance

La mise au point d'un modèle de performance humaine en téléopération forestière serait utile à plusieurs niveaux. D'abord, au niveau pratique, pour:

- la sélection et la formation des opérateurs;
- la planification de la production;
- la comparaison et la conception d'interfaces de commande.

Puis au niveau théorique pour:

- la compréhension des facteurs qui influencent la performance, leurs relations et leur importance respective;
- l'avancement des connaissances sur les interactions humain-machine.

Ainsi, au niveau pratique, la formation des opérateurs serait facilitée par une meilleure compréhension des facteurs responsables de la performance<sup>19</sup>.

Un tel modèle serait également très utile pour prédire de façon objective la vitesse d'apprentissage et le niveau de performance d'un opérateur. Ainsi, pour une tâche de saisie, on serait en mesure de prédire l'évolution de la performance d'un opérateur, à partir de son niveau actuel, ce qui pourrait être utile pour la sélection des candidats et la planification de production.

De plus, un modèle de la performance humaine pour la manipulation à 4 ddl permettrait d'identifier et de comprendre les principaux facteurs qui influencent celle-ci. La connaissance de ces facteurs est essentielle pour pouvoir par la suite comparer ou concevoir des interfaces de commande dans le but d'améliorer la performance globale et la satisfaction de l'opérateur.

Finalement, il ne faut pas négliger l'importance théorique d'un tel modèle qui permettrait

---

<sup>19</sup> Il est important de préciser ici que l'on s'intéresse aux facteurs techniques responsables de la performance et non pas aux facteurs personnels ou organisationnels (comme l'horaire de travail, par exemple).

d'identifier et de mieux comprendre les facteurs qui influencent la performance, tout en mettant en évidence leurs relations et leur importance respective. Ce modèle permettrait l'avancement des connaissances sur l'humain en ergonomie. En effet, plusieurs chercheurs croient depuis longtemps que l'avancement des connaissances en interactions humain-machine repose sur un "durcissement" du domaine à l'aide de modèles quantitatifs semblables à ceux utilisés en ingénierie [Newell, 1985; Accot, 1997].

## 2.4 Hypothèses

L'interface de commande actuelle n'exploite pas les possibilités offertes aujourd'hui par l'informatique embarquée et les nouveaux dispositifs de commande élastiques. Ces possibilités prennent forme à travers l'utilisation de la commande coordonnée en vitesse, l'essai de différents modes de commande coordonnée en vitesse, l'intégration des 4 ddl commandés sur un seul dispositif de commande et l'utilisation de fonctions de gain non-linéaires. L'utilisation de ces possibilités pourrait éventuellement permettre de réduire de façon substantielle la période d'apprentissage lors de la conduite des téléopérateurs forestiers, ce qui devrait résulter en une augmentation significative de la performance des opérateurs durant cette période.

Suite à l'analyse de la tâche et de la situation de travail des opérateurs et suite à la revue de littérature, nous avons pu constater que plusieurs variables sont susceptibles d'affecter la performance et la satisfaction d'un opérateur de machine forestière, particulièrement durant la phase d'apprentissage. Nous allons donc tester les cinq hypothèses suivantes:

- 1) L'utilisation de la commande coordonnée en vitesse améliore la performance et la satisfaction des opérateurs novices<sup>20</sup> comparativement à la commande articulaire en vitesse lors de l'opération d'un téléopérateur forestier à 4 ddl..

---

<sup>20</sup> La notion d'opérateur novice réfère ici aux opérateurs n'ayant au préalable aucune expérience de la tâche à réaliser.

- 2) Il n'y a pas de différence significative de la performance ou de la satisfaction entre les différents modes de commande coordonnée en vitesse lors de l'opération d'un téléopérateur forestier à 4 ddl par des opérateurs novices.
- 3) L'intégration des 4 ddl sur un seul dispositif de commande (au lieu de deux dispositifs à 2 ddl) améliore la performance et la satisfaction des opérateurs novices lors de l'utilisation de la commande coordonnée en vitesse pour opérer un téléopérateur forestier à 4 ddl.
- 4) L'utilisation d'une fonction de gain exponentielle (cubique) plutôt que linéaire améliore la performance et la satisfaction des opérateurs novices lors de l'utilisation de la commande en vitesse pour opérer un téléopérateur forestier à 4 ddl.
- 5) La performance des opérateurs est inversement proportionnelle au rapport de taille entre la cible (diamètre de la tige à saisir) et l'outil de saisie (la pince).

Finalement, même si les lois de Fitts et de la pratique le prédisent déjà, les données expérimentales recueillies permettront de vérifier si la performance de l'opérateur novice s'améliore bien avec la pratique et si le temps d'exécution de la tâche augmente bien avec la distance de la cible. Dans l'affirmative, il faudra vérifier si ces modèles permettent de bien modéliser les tâches de saisie et les valeurs de leurs paramètres.

Le troisième chapitre va maintenant présenter le banc d'essai développé pour effectuer les différentes séries d'essais, ainsi que le plan expérimental adopté pour celles-ci.

## CHAPITRE III - DÉVELOPPEMENT DU BANC D'ESSAI ET PLAN EXPÉRIMENTAL

Tel qu'annoncé dans l'introduction, nous avons utilisé un simulateur graphique 3D d'abatteuse-façonneuse comme banc d'essai. Il a été utilisé pour étudier la performance humaine lors de la commande des téléopérateurs forestiers à 4 ddl. Il est donc important que la simulation soit assez fidèle à la réalité pour que les résultats obtenus lors des essais expérimentaux soient reproductibles sur un téléopérateur réel<sup>21</sup>.

Pour connaître les principaux facteurs responsables du réalisme en simulation graphique 3D, nous avons effectué une brève revue de la littérature se rapportant à ces environnements. Les informations recensées, combinées avec celles recueillies lors de l'analyse ergonomique de la tâche des opérateurs d'abatteuses-façonneuses (section 1.3.2), ont permis de mettre au point un simulateur graphique 3D d'abatteuse-façonneuse. Le réalisme de ce simulateur a été validé par cinq opérateurs experts qui étaient également formateurs en abattage et façonnage des bois au centre de formation professionnelle Mont-laurier, ainsi que par quatre classes de onze étudiants du même cours.

Ce chapitre présente donc un survol de la littérature sur les environnements de simulation graphique 3D, le simulateur utilisé pour les essais expérimentaux, le plan d'expérimentation et les résultats d'une étude-pilote qui a permis de mettre au point les paramètres de notre plan expérimental.

---

<sup>21</sup> Les études antérieure ont montré que les performances obtenues sur simulateur graphique 3D [Wallersteiner, 1988] sont garantes de la performance obtenue sur un téléopérateur réel [Wallersteiner, 1993]. Un tel transfert de connaissance a d'ailleurs été corroboré lors de la formation des opérateurs d'abatteuse-façonneuse à l'aide du simulateur graphique 3D utilisé dans cette recherche [Freedman, 1998; Lapointe 1999]. Ce simulateur reprend l'essentiel du comportement dynamique de la machine forestière, c'est-à-dire le balancement de la tête d'abattage et l'auto-centrage de la tête lors de la saisie des tiges.

### 3.1 Survol de la littérature sur les environnements de simulation

La brève revue de l'état des connaissances concernant les environnements de simulation graphique 3D a permis, entre autres, de prendre connaissance des recommandations ou lignes directrices qui permettront de construire un simulateur graphique le plus représentatif possible d'un téléopérateur forestier réel.

Deux points majeurs ressortent au sujet de la qualité de la perception de la profondeur et du délai entre l'envoi d'une commande et la perception de son effet à l'écran.

#### 3.1.1 Perception de la profondeur

La perception de la profondeur est l'un des problèmes majeurs auxquels doivent faire face les concepteurs d'environnements de simulation graphique 3D [McKenna, 1992; Padmos, 1992; Wanger, 1992; Durlach, 1995; Rinalducci, 1996; Stanney, 1998]. Pour améliorer cette perception, plusieurs indices visuels peuvent être combinés lors de la simulation. Ces indices sont les suivants:

- la stéréopsis<sup>22</sup>;
- la parallaxe de mouvement<sup>23</sup>;
- les ombrages;
- les grilles;
- la texture;
- la projection perspective;
- l'occlusion.

---

<sup>22</sup> *Stéréopsis*: Perception de la profondeur liée à la divergence de point de vue entre les deux yeux

<sup>23</sup> *Parallaxe de mouvement*: Perception de la distance d'un objet grâce à sa vitesse de déformation suite à un déplacement relatif à l'observateur.

L'utilisation de la stéréopsis a déjà démontré son efficacité pour améliorer la perception de la profondeur [Tachi, 1994; Wickens, 1994; Zhai, 1994; Ware, 1995]. Cependant, la vision stéréoscopique n'est efficace que pour les distances inférieures à 10 m, après quoi elle se dégrade progressivement pour devenir complètement inefficace au delà de 135 m [Barfield, 1995; Ware, 1995].

Bien que la stéréopsis soit l'un des indices dominant de la vision 3D chez l'humain, les autres indices visuels listés précédemment (parallaxe de mouvement, ombrages, grilles, texture, projection perspective et occlusion) sont également efficaces, puisqu'ils permettent de bien percevoir la profondeur, même lorsqu'il n'y a pas de disparités binoculaires (et donc pas de stéréopsis), comme c'est le cas lorsque l'on observe une image 3D illustrée sur une surface plane [Wanger, 1992; Ware, 1995].

### **3.1.2 Délai de traitement de l'information**

Dans tous les cas, l'ajout d'indices visuels augmente d'un facteur non négligeable le nombre de calculs requis pour effectuer la simulation graphique, ce qui se répercute sur la fréquence de rafraîchissement de la scène à l'écran. Plus cette fréquence est basse, plus le délai est long entre l'émission d'une commande et la perception de ses effets, ce qui affecte le temps d'exécution d'une tâche telle que le pointage [Ware, 1994].

Le délai introduit entre la commande et la réponse d'un système provient de l'accumulation de plusieurs petits délais tels que la période d'échantillonnage, le temps d'acquisition et le temps de traitement des signaux en provenance des dispositifs de commande. À cela s'ajoutent les temps de calcul et d'affichage de la scène dans le cas d'un simulateur graphique ou encore, le temps de transmission et de réponse du bras manipulateur en téléopération réelle. Toutes les recherches effectuées sur le sujet confirment qu'il est essentiel de minimiser le délai total entre la commande et la perception de la réponse, sans quoi il y a dégradation notable de la performance. Les normes militaires [MIL-STD1472D,

1991] recommandent de limiter ce délai à 100 ms au plus, ce qui semble faire consensus chez les chercheurs [Burdea, 1993], même s'il a été démontré qu'un délai aussi court que 75 ms dégrade encore les performances lors de tâches de pointage [MacKenzie, 1993].

En simulation graphique, le plus grand délai provient généralement du temps de calcul lié à l'affichage de la scène à l'écran. L'idéal est de rafraîchir l'écran à la fréquence la plus élevée possible. En ce qui concerne la simulation, on recommande de maintenir la fréquence de rafraîchissement à un niveau égal ou supérieur à 14 Hz, dans le but de limiter les problèmes de perception. En effet, en deçà de ce niveau, la perception et donc les performances humaines diminuent de façon exponentielle, tel que l'ont démontré plusieurs chercheurs [Ranadive, 1979; Massimino, 1989b; Burdea, 1993; Ware, 1994].

Par conséquent, comme la vitesse de calcul d'un ordinateur est limitée, nous avons intégré au simulateur le plus grand nombre d'indices visuels possibles, tout en limitant le délai total à environ 100 ms (voir section 3.2.3 pour la liste des indices utilisés). Comme les délais associés aux dispositifs de commande sont d'environ 25 ms, nous avons atteint notre objectif de 100 ms en maintenant une fréquence de rafraîchissement de la scène égale ou supérieure à 14 Hz, ce qui correspond à un délai maximal de 71 ms. Ce délai est contrôlé et maintenu constant d'une expérience à l'autre, pour ne pas influencer la performance obtenue.

Finalement, il est intéressant de noter qu'un délai de cet ordre (100 ms) est typique des délais rencontrés sur les téléopérateurs utilisés en construction et en foresterie.

### 3.2 Description du simulateur graphique

Le simulateur graphique utilisé comme banc d'essai pour les essais expérimentaux est constitué d'un agencement de matériel et de logiciel que nous allons définir ici. C'est sur ce banc d'essai que se sont déroulées toutes les expériences décrites dans cette thèse.

### 3.2.1 Description matérielle

Pour la partie matérielle, ce banc d'essai est constitué d'un poste de travail graphique et de deux sièges ajustables munis d'accoudoirs au bout desquels on retrouve respectivement les dispositifs de commandes décrits précédemment (soit un palonnier à 4 ddl ou deux manettes à 2 ddl, tel qu'illustré à la figure 3.1).

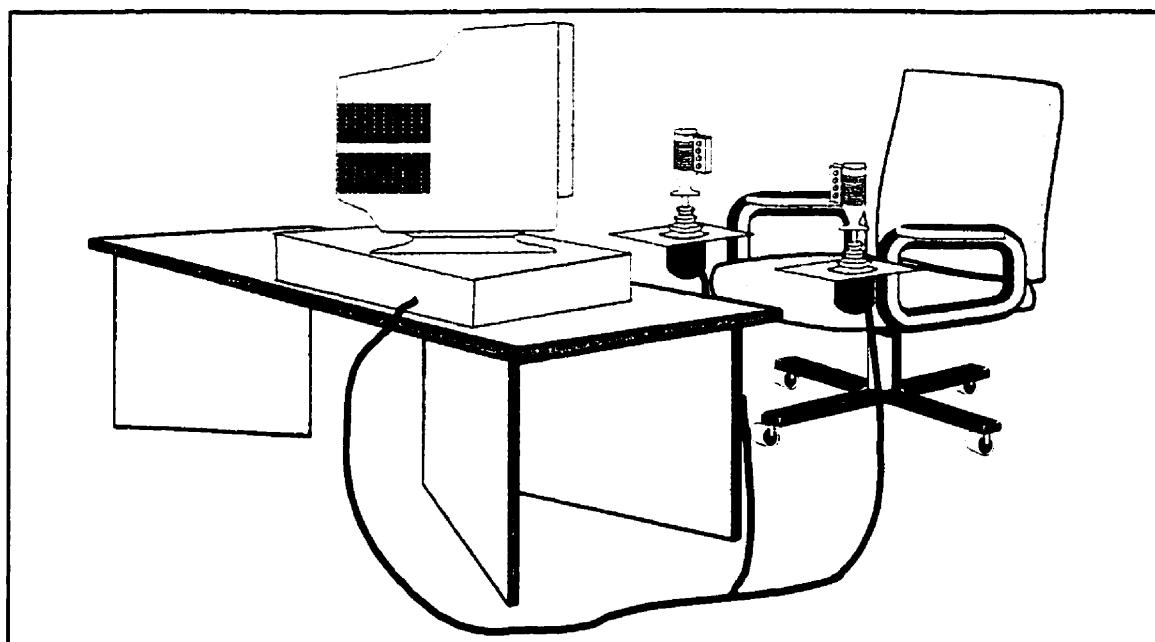


Figure 3.1 Illustration du simulateur graphique avec interface conventionnelle

Les caractéristiques et la disposition des dispositifs de commande et de l'écran du simulateur ont fait l'objet d'une étude ergonomique visant à s'assurer des conditions de travail et de confort optimales [Lapointe, 1994b].

La simulation graphique est effectuée sur un poste de travail O<sup>2</sup> de Silicon Graphics, muni d'un microprocesseur R5000 cadencé à 180 Mhz, de 128 Mo de mémoire vive et d'un écran graphique couleur de 21 pouces de diagonale (20" visible) de résolution 1280 x 1024 pixels (horizontal x vertical).

Les deux manettes à 2 ddl de marque Danfoss et le palonnier à 4 ddl de marque RSI Research sont reliés au poste de travail via un port série de type RS-232 grâce à un bloc de liaison électronique fabriqué à l'aide d'un microcontrôleur 68HC11 de Motorola. Un sélecteur d'interface permet de passer du palonnier à 4 ddl aux deux manettes à 2 ddl à l'aide d'un simple basculement de position du sélecteur.

Les manettes utilisées ont une hauteur de 215 mm, tandis que le palonnier a une hauteur de 175 mm, mesurée à partir de leur support situé au bout de l'accoudoir du siège (voir figure 3.1). Quant au diamètre des poignées, il est de 40 mm pour les manettes et de 35 mm pour le palonnier.

### **3.2.2 Description logicielle**

Du point de vue logiciel, le simulateur est programmé en langage C, utilise la bibliothèque de fonctions graphiques 3D OpenGL, le système d'exploitation IRIX 5.2 et l'interface graphique X-Windows pour les fonctions de fenêtrage et d'interface usager. Finalement, la détection des collisions entre les objets de la scène est réalisée à l'aide de la bibliothèque de fonctions I-Collide développée par le groupe de recherche en modélisation physique et géométrique du département de science informatique de l'Université de Caroline du Nord.

Plusieurs indices visuels ont été utilisés pour améliorer la perception 3D de la scène à l'écran. Cependant, comme convenu précédemment à la section 3.1.2, nous avons dû limiter leur nombre (en raison de la vitesse de calcul limitée de l'ordinateur) de façon à ne pas dépasser un délai total de 100 ms. Les indices qui ont été incorporés à notre simulateur graphique sont: la projection perspective, les ombrages, la texture, une grille au sol, l'occlusion des objets de la scène et un curseur projeté sur le sol pour mieux situer la position et l'orientation de l'outil du téléopérateur forestier dans la scène.

Comme on peut le constater, il s'agit là de tous les indices visuels listés précédemment, à

l'exception de la stéréopsis. Cet indice a été éliminé plutôt que les autres surtout en raison de sa grande exigence en terme de puissance de calcul (la projection stéréoscopique doublait pratiquement le délai total), mais aussi en raison du fait que les tâches à réaliser étaient situées à une distance virtuelle de l'opérateur d'environ 10 m. Or comme nous l'avons vu auparavant, à cette distance, la stéréopsis n'est déjà plus un indice efficace de perception de la profondeur.

### **3.2.3 Description de la simulation**

Sur l'écran du simulateur graphique apparaît un bras manipulateur à 4 ddl tel que vu à partir de la cabine de pilotage d'un téléopérateur forestier de type abatteuse-façonneuse (voir figure 3.4 plus loin).

L'opérateur assis sur le siège peut commander le bras manipulateur à l'aide des dispositifs de commande, tout comme s'il se trouvait à l'intérieur d'un vrai téléopérateur forestier. Il peut ainsi saisir les arbres situés à l'écran et qui sont à portée de son bras manipulateur. Un bouton situé sur les dispositifs de commande permet d'actionner la saisie d'un arbre à l'aide de l'outil (une pince) situé au bout du bras manipulateur.

Une fois la saisie effectuée, le simulateur enregistre automatiquement la performance de l'opérateur pour la tâche de saisie qu'il vient de compléter. Une description détaillée des critères de performance et des tâches de saisie est donnée à la section 3.3. À noter que les données sont enregistrées dans un fichier texte sous un format qui peut par la suite être analysé à l'aide d'un chiffrier électronique standard.

### **3.2.4 Contribution au développement du simulateur**

La majeure partie de la réalisation matérielle et logicielle a été effectuée dans le cadre du projet ATREF par des employés du CRIM. Nous avons cependant modifié l'architecture

logicielle pour y incorporer les trois modèles cinématiques de commande coordonnée en vitesse (cylindrique, cartésien, tangentiel) conformes à nos spécifications (voir annexes 3 et 4), les différents dispositifs de commande et les fonctions de gain discutées précédemment (sections 2.1.3 et 2.1.4). Nous avons également programmé les fonctions d'évaluation des critères de performance et défini le format du fichier d'enregistrement des données de performance.

En ce qui concerne l'interface utilisateur, nous avons participé activement à sa définition en collaboration avec le développeur principal et deux opérateurs de téléopérateurs forestiers expérimentés. Finalement, nous avons défini le format du fichier de spécification des essais qui permet l'exécution automatique des essais un à la suite de l'autre en spécifiant d'avance pour chaque essai les paramètres concernant la position, la taille et le diamètre de l'arbre, la position initiale du bras manipulateur, et la position de la cible de saisie sur l'arbre. L'exécution automatique des essais permet de minimiser les interventions de l'expérimentateur lors du déroulement des expériences.

En tout, environ 3 mois de travail à temps plein ont été investis pour réaliser ces différents objectifs. Au niveau de la programmation seulement, environ 1500 lignes de code source ont été écrites, sur un total d'environ 30 000 lignes pour le logiciel de simulation au complet.

### **3.3 Plan d'expérimentation**

Suite à notre présentation de l'état des connaissances en téléopération forestière et suite à notre brève revue de littérature sur les environnements de simulation graphique 3D, nous pouvons maintenant définir le plan expérimental qui a été utilisé.

Ainsi, nous avons réalisé une étude-pilote suivie de trois séries d'essais empiriques sur banc d'essai (simulateur graphique de téléopérateur). Cette façon de faire fut choisie en raison de la faible disponibilité et des coûts d'utilisation élevés reliés à l'utilisation de téléopérateurs

forestiers réels.

L'étude-pilote avait pour but de tester le banc d'essai, de déterminer la durée et le nombre d'essais requis et d'améliorer la procédure expérimentale suite aux commentaires des opérateurs.

La première série d'essais empiriques visait à étudier la performance initiale et les préférences des opérateurs novices lors de la conduite d'un téléopérateur forestier à 4 ddl à l'aide de différentes interfaces de commande. Ces essais ont également aidé à sélectionner les interfaces de commande les plus prometteuses en terme de performance.

Les deux dernières séries d'essais ont permis de modéliser la performance des opérateurs. Ainsi, la deuxième série d'essais visait à étudier l'effet de la pratique de l'opérateur et de la distance de la cible sur sa performance, dans le but de raffiner notre modèle de performance. La troisième série d'essais, quant à elle, visait à mesurer l'effet du rapport de taille entre la cible et l'outil de saisie sur la performance.

Finalement, dans le cadre du projet ATREF, des travaux ont été réalisés par l'Institut canadien de recherches en génie forestier pour comparer, sur un téléopérateur réel, l'interface de commande conventionnelle à l'interface jugée optimale selon les résultats obtenus sur simulateur, dans le but de valider ces derniers [Desrochers, 1998; Turcotte, 1998].

Pour bien s'y retrouver, voici un tableau récapitulatif des différentes séries d'essais qui ont été réalisées.

**Tableau 3.1 Description des différentes séries d'essais**

Série	Chapitre	Description	Nombre de sujets	Nombre d'essais par sujet
1	4	Étude pilote	6	264
2	4	Étude comparative de différentes interfaces de commande concernant leur effet sur la performance et la satisfaction d'opérateurs novices.	12	200
3	5	Effet de la pratique et de la distance de la cible sur la performance d'opérateurs novices.	11	2452
4	5	Effet du rapport de taille cible/outil sur la performance d'opérateurs novices et précisions sur la notion de distance.	11	685

### **3.3.1 Description des tâches expérimentales**

Les tâches à exécuter lors des essais expérimentaux doivent être représentatives de celles qui sont exécutées en téléopération forestière. De plus, ces tâches doivent être assez simples pour éviter que la planification de tâche ne vienne influer sur la performance des opérateurs.

Les tâches choisies consistent en des tâches de saisie de tiges verticales (représentant chacune un arbre sur pied) et horizontales (représentant une grume couchée sur le sol) à une certaine position le long de celles-ci et selon une certaine orientation dans le plan horizontal. Il y a donc deux tâches (saisie verticale et saisie horizontale) qui ont une ou plusieurs distances de saisie selon la série d'essais. Ces distances sont mesurées en terme de distances

articulaires entre la position initiale du bras manipulateur (au début de la tâche, figure 3.2) et sa position finale désirée (celle obtenue à la fin de la saisie si l'arbre est saisi de façon parfaite sur la cible indiquée).

Pour mieux comprendre la tâche à réaliser, les figures 3.2 et 3.3 ci-dessous illustrent la tâche de saisie verticale avec la position initiale du bras manipulateur (figure 3.2) et sa position finale (qui dévie légèrement de la position désirée, tel qu'illustré par la divergence d'environ 15 degrés entre la bande "rouge" et la bande "bleue" de la figure 3.3<sup>24</sup>).

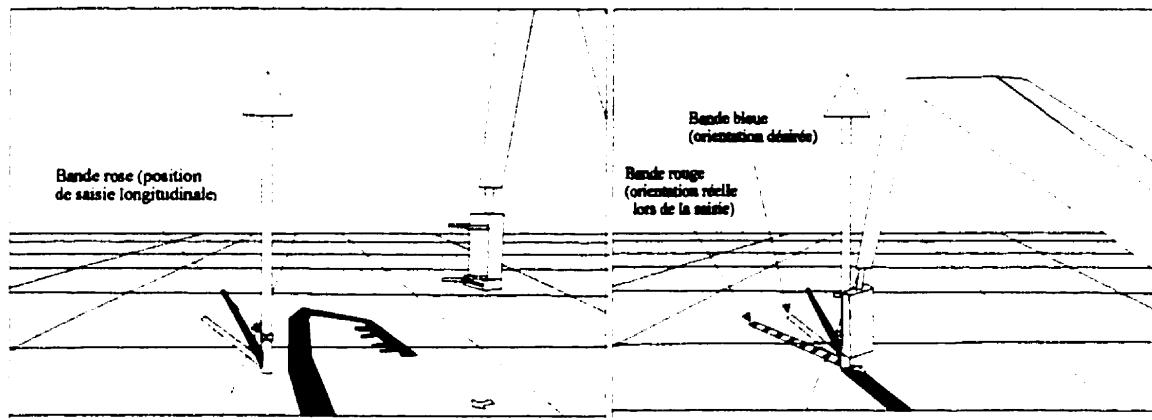


Figure 3.2 Tâche de saisie verticale (début)

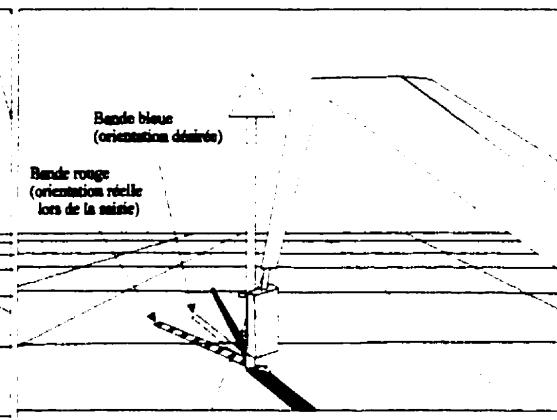


Figure 3.3 Tâche de saisie verticale (fin)

Une bande rose affichée sur la tige indique la position de saisie longitudinale (figure 3.2), tandis que l'orientation est indiquée par un indicateur sur le sol pour la tâche de saisie

<sup>24</sup> Veillez noter que pour des raisons de clarté, les figures 3.2 et 3.3 ne représentent que les contours des éléments principaux de la scène pour la tâche de saisie horizontale et non pas l'image apparaissant à l'écran. La figure 3.4 cependant, représente bien l'image apparaissant à l'écran du simulateur et on peut y apercevoir tous les éléments de couleur, d'ombrage et de texture au sol ainsi qu'à l'arrière-plan.

verticale (figure 3.3) et directement par la position de la tige sur le sol dans le cas de la saisie horizontale (figure 3.4)<sup>25</sup>.

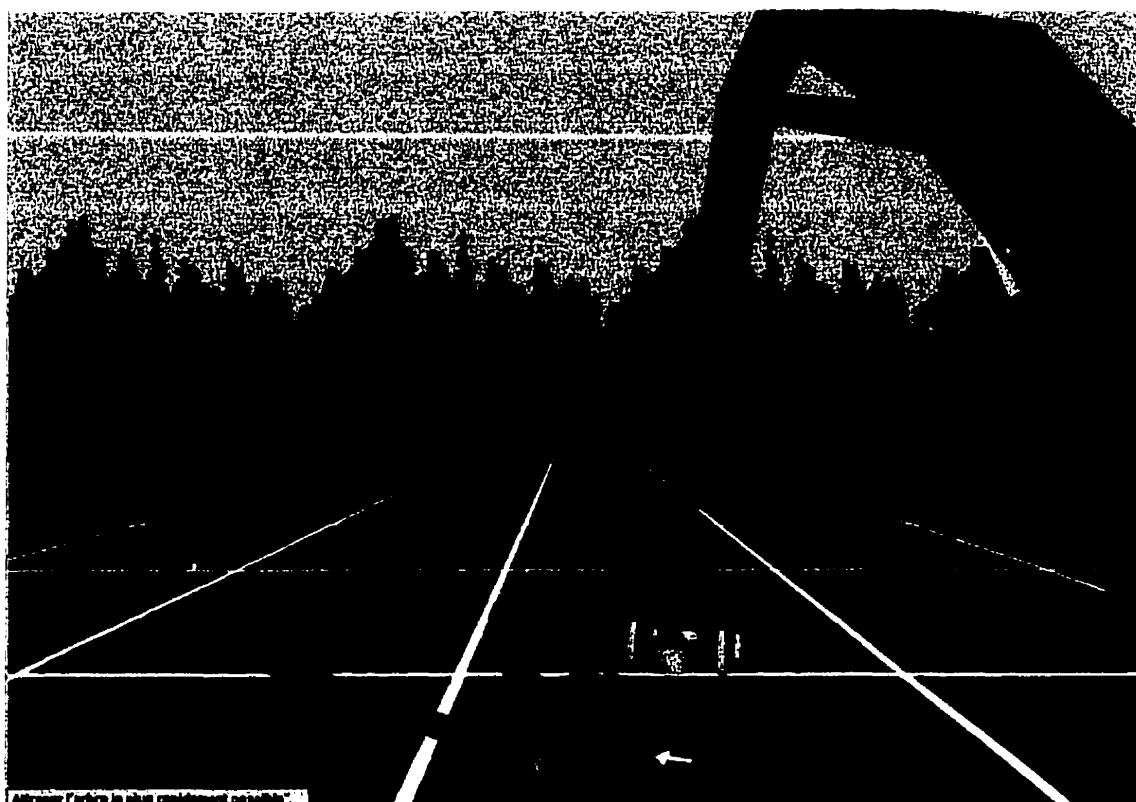


Figure 3.4 Tâche de saisie horizontale avec texture au sol et à l'arrière-plan

L'opérateur a pour instruction de saisir la tige en positionnant l'outil de saisie (une pince située au bout du bras manipulateur) autour de celle-ci, selon l'orientation désirée et en alignant la scie mécanique de l'outil à la hauteur de la bande sur la tige. Chaque essai est précédé d'un compte à rebours sonore de trois secondes et une fois le positionnement et l'orientation terminés, l'opérateur doit appuyer sur le bouton de fermeture de la pince pour

---

<sup>25</sup> À noter que l'orientation de la tête est aussi importante que sa position lors de la saisie d'une tige, qu'elle soit verticale ou horizontale. Ainsi pour la tâche de saisie verticale, l'orientation détermine la direction d'abattage de l'arbre, tandis que pour la saisie horizontale, elle permet de saisir la tige lorsque la pince lui est orientée parallèlement.

compléter la tâche.

Un retour sonore indique alors la réussite à l'aide d'un "blip" sonore, ou l'erreur de la saisie en faisant entendre un cri de déception (le fameux "Doh!" d'Homer Simpson). Lorsque la saisie est réussie, l'opérateur peut constater son erreur d'orientation en comparant l'orientation désirée (la bande bleue au sol) à l'orientation de la pince lors de la saisie qui s'affiche sous forme d'une bande rouge étendue sur le sol à partir de la base de l'arbre (voir figure 3.3). Finalement, un retour sonore indique les collisions du bras manipulateur ou de son outil avec les éléments de la scène (sol et tiges). La section suivante explique plus en détail les critères de mesure de la performance lors de la saisie.

Pour réduire le biais dû au choix d'une distance de cible en particulier, deux distances ont été utilisées pour chacune des deux tâches de saisie. Ainsi, pour les deux premières séries d'essais le diamètre de la tige était constant (0,25 m), mais les cibles utilisées (positions finales désirées) étaient situées à des distances respectives de 20° et 40° de la position initiale des différentes articulations du bras manipulateur.

Pour alléger le texte par la suite, nous référerons parfois à la tâche de saisie verticale comme étant la tâche 1 et la tâche de saisie horizontale (couchée par terre) comme étant la tâche 2.

### **3.3.2 Définition des critères de performance**

Comme un de nos objectifs de recherche consiste à modéliser la performance humaine, il est temps de préciser ce terme. Comme nous l'avons vu à la section 2.3.1, la performance est caractérisée par le temps d'exécution (ou temps de mouvement) d'une tâche typique (de saisie dans notre cas) et par la qualité d'exécution, généralement exprimée sous forme d'un critère mixte précision/taux d'erreur.

Nos critères de performance sont donc:

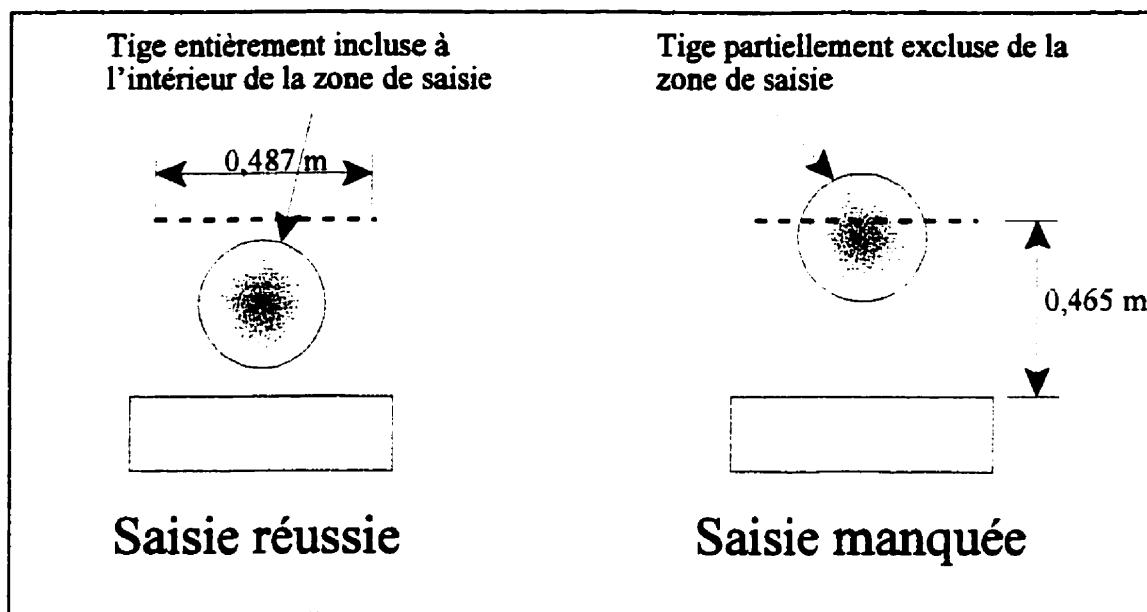
- le temps de mouvement;
- le taux d'erreur obtenu lors de l'exécution de la tâche;
- la précision obtenue lors de l'exécution de la tâche selon les 4 ddl:
  - l'écart longitudinal;
  - l'écart latéral;
  - l'écart d'approche;
  - l'écart d'orientation.

### **Temps de mouvement**

Le temps de mouvement est le temps écoulé entre le premier mouvement de l'opérateur (qui est autorisé dès la fin du compte à rebours) et la saisie indiquée par l'opérateur lorsqu'il appuie sur la touche de fermeture des pinces. Pour plus de détails sur la tâche, se référer à la section 3.3.4.

### **Taux d'erreur**

Le taux d'erreur est le rapport entre le nombre de saisies manquées (erreurs) et le nombre total de saisies (et donc d'essais) effectués. On considère qu'il y a erreur de saisie lorsque l'opérateur active la fermeture de la pince alors que la cible n'est pas entièrement située à l'intérieur de celle-ci, tel qu'illustré à la figure 3.5.



**Figure 3.5** Illustration du critère de succès ou d'erreur de saisie

### Précision

La précision obtenue est la distance qui sépare la cible de la pince, selon les 4 ddl, tel que défini à la figure 3.6 ci-après. Ainsi, nous avons pour chacun des 4 ddl:

- l'écart longitudinal (m);
- l'écart latéral (m);
- l'écart d'approche (m);
- l'écart d'orientation ( $^{\circ}$ ).

**Écart longitudinal:** distance qui sépare le centre de la cible du centre de la scie mécanique situées au bas de la pince, mesurée parallèlement à la tige.

**Écart latéral:** distance qui sépare le centre de la cible du centre de la scie mécanique, mesurée parallèlement au fond de la pince.

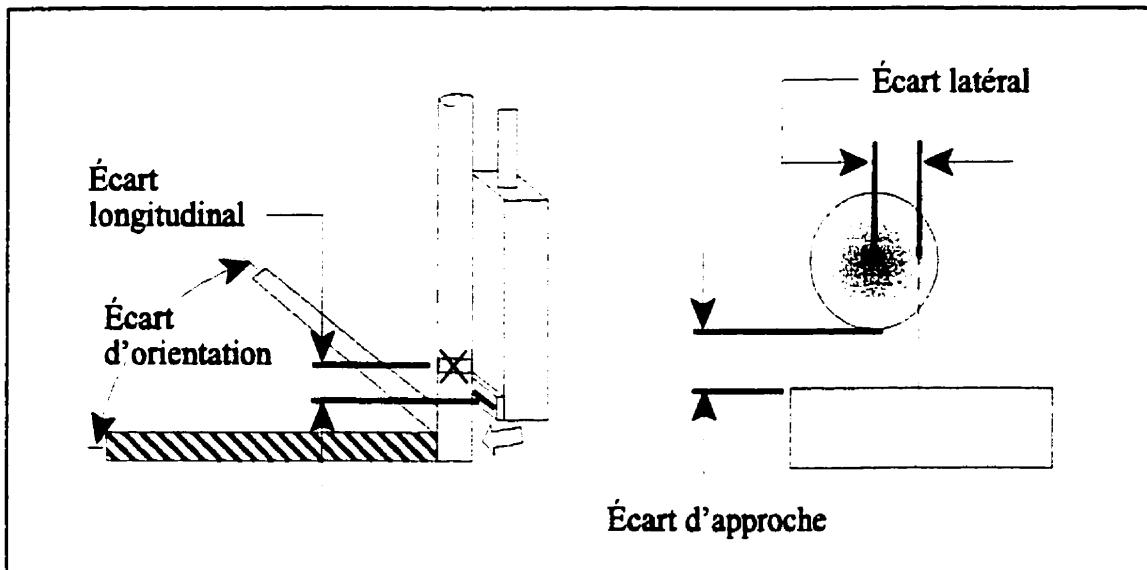


Figure 3.6 Illustration des critères de précision

*Écart d'approche:* distance qui sépare la cible du fond de la pince, mesurée perpendiculairement au fond de la pince.

*Écart d'orientation:* distance angulaire qui sépare l'orientation désirée pour la saisie de la cible et l'orientation réelle de la pince lors de la saisie.

On peut facilement comprendre que l'écart latéral et l'écart d'approche sont intimement liés au taux d'erreur, car lorsqu'ils sont trop élevés, il survient une erreur de saisie. Il en va de même pour l'écart d'orientation dans le cas de la saisie verticale.

## CHAPITRE IV - ÉTUDE COMPARATIVE DE DIFFÉRENTES INTERFACES DE COMMANDE

Tel que vu au second chapitre (section 2.4), les quatre hypothèses à tester concernant les possibilités offertes par l'informatique embarquée, les dispositifs de commande à 4 ddl et les fonctions de gain sont:

- 1) L'utilisation de la commande coordonnée en vitesse améliore la performance et la satisfaction des opérateurs novices comparativement à la commande articulaire en vitesse lors de l'opération d'un téléopérateur forestier à 4 ddl.
- 2) Il n'y a pas de différence significative de la performance ou de la satisfaction entre les différents modes de commande coordonnée en vitesse lors de l'opération d'un téléopérateur forestier à 4 ddl par des opérateurs novices.
- 3) L'intégration des 4 ddl sur un seul dispositif de commande (au lieu de deux dispositifs à 2 ddl) améliore la performance et la satisfaction des opérateurs novices lors de l'utilisation de la commande coordonnée en vitesse d'un téléopérateur forestier à 4 ddl.
- 4) L'utilisation d'une fonction de gain exponentielle (cubique) plutôt que linéaire améliore la performance et la satisfaction des opérateurs novices lors de l'utilisation de la commande en vitesse pour opérer un téléopérateur forestier à 4 ddl.

Pour arriver à nos fins, nous avons effectué deux séries d'essais expérimentaux, tel que décrit au chapitre précédent.

La première série d'essais est une étude-pilote, dont le but et les paramètres sont définis ci-après. La deuxième série est celle des essais principaux qui permet de comparer les

performances humaines obtenues sur le simulateur lors de l'exécution de tâches de saisie à l'aide de différentes interfaces de commande combinant divers modes de commande, dispositifs de commande et fonctions de gain.

## **4.1 Étude-pilote**

### **4.1.1 Objectifs**

Maintenant que le plan d'expérimentation est complété, cette étude-pilote a pour but de mettre au point la procédure expérimentale, le banc d'essai informatique développé pour les essais et les méthodes d'analyse statistique des résultats. Cette étude-pilote vise également à déterminer le nombre et la durée des essais à effectuer.

### **4.1.2 Méthodologie**

La méthodologie utilisée pour mener à bien l'étude-pilote est décrite dans les sous-sections qui suivent.

#### **4.1.2.1 Tâches**

Nous avons utilisé les tâches expérimentales décrites à la section 3.3.1 pour évaluer la performance des opérateurs.

#### **4.1.2.2 Sujets**

Six sujets volontaires et non payés qui étaient employés ou étudiants au CRIM ont participé à cette étude. Ils étaient âgés de 23 à 43 ans, possédaient tous un diplôme universitaire, avaient une vision parfaite ou corrigée et n'avaient aucune expérience de la tâche à exécuter.

#### 4.1.2.3 Système

Les essais se sont déroulés sur le banc d'essai (simulateur graphique) décrit au chapitre précédent. Cependant, à ce moment, le logiciel de simulation n'intégrait pas encore des éléments de texture permettant de mieux percevoir la profondeur dans les scènes présentées à l'écran.

#### 4.1.2.4 Variables indépendantes

Les variables indépendantes utilisées sont:

- 1) L'intégration du/des dispositif(s) de commande:
  - 2 manettes à 2 ddl;
  - 1 palonnier à 4 ddl;
- 2) Le mode de commande en vitesse:
  - commande articulaire;
  - commande coordonnée:
    - cartésienne
    - cylindrique
    - tangentielle
- 3) La fonction de gain:
  - linéaire
  - exponentielle (cubique)

En combinant les différents niveaux de chacune des trois variables indépendantes, on obtient 16 traitements<sup>26</sup> possibles pour l'interface de commande, répertoriés au tableau 4.1.

---

<sup>26</sup> *Traitement*: combinaison de niveaux des différentes variables indépendantes étudiées. Dans ce cas-ci, il s'agit de différentes interfaces de commande, définies au tableau 4.1.

**Tableau 4.1** Liste des traitements possibles

Traitement	<u>Dispositifs de commande</u>	Mode de commande en vitesse	<u>Fonction de gain</u>
	Palonnier à 4 ddl (1x4) 2 manettes à 2 ddl (2x2)		Linéaire (L) Exponentielle (E)
1	2x2	articulaire	L
N/E	2x2	articulaire	E
N/E	2x2	cartésienne	L
N/E	2x2	cartésienne	E
2	2x2	cylindrique	L
N/E	2x2	cylindrique	E
N/E	2x2	tangentiel	L
N/E	2x2	tangentiel	E
N/E	1x4	articulaire	L
N/E	1x4	articulaire	E
3	1x4	cartésienne	L
4	1x4	cartésienne	E
5	1x4	cylindrique	L
6	1x4	cylindrique	E
7	1x4	tangentiel	L
8	1x4	tangentiel	E

N/E: traitement qui n'a pas été étudié dans le but de minimiser le nombre d'essais

L'essai de toutes ces combinaisons pour l'interface de commande exigerait un nombre élevé d'essais. Heureusement, ces traitements ne sont pas tous d'un même intérêt.

En effet, toutes les études effectuées à date s'accordent pour dire que la commande coordonnée est plus efficace que la commande articulaire, sans toutefois préciser un ordre de grandeur [Withney, 1969; Stark, 1987b; Sheridan, 1992; Lawrence, 1993]. Nous ne nous sommes donc pas attardés à mesurer la performance obtenue avec les interfaces qui utilisent le mode de commande articulaire, sauf en ce qui concerne l'interface de commande conventionnelle (traitement 1 du tableau 4.1) pour établir une base de comparaison avec les autres interfaces de commande.

De plus, seul un traitement combinant la commande coordonnée (cylindrique) à deux manettes de commande (traitement 2 du tableau 4.1) a été utilisé. Les résultats obtenus avec cette interface permettront de mesurer l'effet de l'utilisation exclusive de la commande coordonnée (non combinée à un dispositif de commande intégré) sur la performance humaine (en comparant avec la combinaison 1). Ils permettront également de mesurer l'effet de l'intégration des dispositifs de commande sur la performance humaine lors de la commande coordonnée (en comparant avec la combinaison 5).

Finalement, toutes les combinaisons d'interface de commande avec un seul dispositif à 4 ddl utilisant les modes de commande coordonnée et les fonctions de gain sont étudiées, dans le but de mettre en évidence toute interaction entre ces deux facteurs.

Nous sommes ainsi à même d'atteindre nos objectifs, à savoir mesurer l'effet des dispositifs de commande, du mode de commande et de la fonction de gain sur la performance en n'utilisant que 8 des 16 combinaisons possibles. Cette mesure réduira de moitié le nombre d'essais à effectuer, sans affecter la valeur des résultats obtenus.

#### **4.1.2.5 Variables dépendantes**

Les variables dépendantes utilisées sont la performance et la satisfaction.

##### **Performance**

La performance est évaluée selon les critères de temps de mouvement, de taux d'erreur et de précision définis à la section 3.3.2.

##### **Satisfaction**

La satisfaction est évaluée par un questionnaire où les sujets indiquent leur satisfaction relative à l'égard des diverses combinaisons de dispositifs de commande, de modes de commande et de fonctions de gain testées.

#### **4.1.2.6 Variables de contrôle**

Les variables de contrôle, dont les niveaux sont définis ci-après, sont les suivantes:

- l'étendue de mouvement des axes des dispositifs de commande;
- la rigidité des ressorts de rappel;
- le positionnement des dispositifs de commande;
- la complexité d'opération de l'outil;
- les vitesses maximales des articulations du bras manipulateur;
- les indices de perception 3D;
- le délai entre une commande et la perception de ses effets (retour d'information);
- la fidélité de la simulation;
- l'expérience de l'opérateur avec la tâche;
- le rapport de taille entre la cible et l'outil.

### **Étendue de mouvement des axes des dispositifs de commande**

L'étendue de mouvement des axes horizontaux des dispositifs de commande est fixée à 20 degrés de part et d'autre de l'axe vertical, une valeur qui respecte les normes ergonomiques militaires [MIL-STD1472D, 1991] et qui semble faire l'objet d'un consensus de la part des divers fabricants de manettes (Danfoss, RSI Research, Honeywell, P/Q controls, Measurement Systems, etc.).

Pour ce qui est de l'axe vertical du palonnier (dispositif de commande à 4 ddl), l'étendue de mouvement est de  $\pm 2,5$  cm, une valeur du même ordre que pour le déplacement de la main de l'opérateur selon les axes horizontaux, ce qui est préférable, car la dynamique de commande est alors semblable selon chaque axe. Finalement, l'étendue de mouvement est de  $\pm 15$  degrés pour la rotation autour de l'axe vertical en raison de la plage de flexion limitée du poignet en pronation.

### **Rigidité des ressorts de rappel**

Les ressorts de rappel des manettes et du palonnier respectent les limites de rigidité spécifiées dans les normes ergonomiques militaires, où on spécifie que les manettes de commande doivent fournir une force de rappel maximale d'une valeur située entre 3.3 N et 8.9 N [MIL-STD1472D, 1991]. Compte tenu de la distance d'environ 10 cm qui sépare le point d'appui de la main et le pivot de la manette, cette force correspond à un couple de torsion maximal de 33 N·m à 89 N·m.

### **Positionnement des dispositifs de commande**

La place la plus naturelle et la plus confortable pour installer les dispositifs de commande est de part et d'autre de l'opérateur au bout de l'accoudoir du siège (voir figure 3.1), tel que l'ont démontré plusieurs études sur le pilotage d'hélicoptères [Staten, 1970; Aiken, 1986].

C'est d'ailleurs cette configuration qui est retenue pour le pilotage des hélicoptères «Comanche» qui constitueront la prochaine génération d'hélicoptères d'attaque et de reconnaissance de l'armée américaine [McKenna, 1996]. L'emplacement des accoudoirs et de la manette ont déjà fait l'objet d'une étude ergonomique [Lapointe, 1994b] dont on a utilisé les résultats et les recommandations pour la conception du banc d'essai informatique d'interfaces de commande (voir chapitre 3).

### **Complexité d'opération de l'outil**

Dans le but de limiter l'influence de la complexité d'opération de l'outil, nous avons utilisé un outil simple de type binaire, soit une pince, qui possède deux états, soit ouvert ou fermé.

### **Vitesses maximales des articulations du bras manipulateur**

En ce qui concerne les vitesses maximales des articulations du bras manipulateur, les téléopérateurs utilisés en construction et en foresterie ont généralement des manipulateurs dont les articulations ont une vitesse de déplacement assez semblable d'un véhicule à l'autre. Nous avons donc utilisé les vitesses articulaires typiques pour ce genre de véhicule, soit 20°/s pour les trois premières articulations et 90°/s pour la dernière articulation, qui sert à l'orientation de l'outil. À noter que les quatre articulations peuvent être déplacées simultanément. Pour de plus amples informations, consulter l'annexe 4, qui présente le modèle cinématique du téléopérateur simulé.

### **Indices de perception 3D**

Les indices de perception 3D utilisés sont ceux spécifiés à la section 3.2.2, à savoir: la projection perspective, les ombrages, la texture, l'ajout de grilles au sol, l'ombrage, l'occlusion des objets de la scène et un curseur projeté sur le sol pour mieux situer la position et l'orientation de l'outil du téléopérateur dans le plan horizontal.

### **Fidélité de la simulation**

Tout comme pour l'affichage graphique des indices de perception 3D, la fidélité et surtout le réalisme de la simulation sont limités par la puissance de calcul de l'ordinateur. Ainsi, le modèle mathématique du téléopérateur qui est utilisé lors de la simulation recrée l'essentiel du comportement dynamique de la machine forestière. Pour y arriver, le simulateur utilise un modèle cinématique complet du téléopérateur, un modèle dynamique du balancement de la tête et un modèle d'interaction entre la pince et les arbres (mécanisme d'auto-centrage lors de la fermeture des pinces). Les modèles géométriques et cinématiques du téléopérateur sont présentés respectivement aux annexes 3 et 4.

La grande différence entre la simulation et la réalité est surtout liée à la représentation de l'environnement (arbres, terrain, etc.), car en ce qui concerne la commande du bras manipulateur, la sensation est à toute fin pratique identique. Cette affirmation a d'ailleurs été corroborée par les cinq formateurs du centre de formation professionnelle où a été testé le simulateur. Il s'agissait d'opérateurs experts avec plusieurs années d'expérience d'opération d'abatteuse-façonneuse en forêt. Deux d'entre eux ont d'ailleurs participé activement au développement du simulateur à la suite de visites qui avaient pour but de valider la simulation lors des phases préliminaires de développement.

### **Expérience de l'opérateur avec la tâche**

Finalement, pour contrôler l'effet de l'expérience de l'opérateur, tous les sujets choisis sont novices dans le domaine et ne possèdent aucune expérience de la tâche à effectuer et des interfaces de commande utilisées. Par la suite, nous caractériserons l'expérience de l'opérateur par le nombre de pratiques qu'il a effectuées avec une tâche. L'utilisation de sujets novices vise à éviter un biais de performance en faveur de l'interface de commande conventionnelle, i.e. celle qui utilise deux manettes de commande en mode articulaire et une fonction de gain linéaire.

### **Rapport de taille entre la cible et l'outil**

Pour éviter l'effet du rapport de taille entre le diamètre de la cible (la tige à saisir) et celui de l'outil, nous avons utilisé des cibles d'un diamètre constant de 0,25 m, tandis que le diamètre maximal pouvant être inscrit à l'intérieur de l'outil (et donc être saisi sans erreur, selon notre définition de la section 3.3.2) est de 0,465 m (figure 3.5). Nous pouvons donc dire que le rapport de taille cible/outil utilisé est de 0,53. À noter que l'effet du rapport de taille cible/outil est étudié au prochain chapitre.

#### **4.1.2.7 Procédure expérimentale**

Avant de procéder aux essais, chaque sujet avait droit à une période d'explication et de démonstration du banc d'essai et de la tâche à effectuer en présence de l'expérimentateur. Il était également informé des objectifs de l'expérience et du déroulement des opérations. Pour s'assurer que chaque sujet reçoive les mêmes explications, celles-ci étaient consignées sous forme écrite et lues à voix haute à ce dernier par l'expérimentateur avant de débuter les essais. Ce dernier répondait également aux questions des sujets concernant les directives.

Les sujets devaient également répondre à un bref questionnaire qui servait à recueillir les informations nécessaires aux fins de l'expérience, à savoir:

- nom et prénom;
- âge;
- latéralité (droitier ou gaucher);
- niveau de scolarité;
- expérience antérieure avec la tâche;
- présence d'une déficience au niveau moteur ou visuel.

Les essais expérimentaux se sont déroulés à l'intérieur d'un bureau fermé du CRIM, du 13 au 15 mai 1997 et les sujets portaient tous un casque d'écoute qui servait à la fois à les isoler

des bruits extérieurs à leur fournir les retours d'information sonore décrits précédemment (comptes à rebours, collisions et résultats des saisies).

Lors des essais expérimentaux, les sujets effectuaient une pratique et n répliques pour chacune des quatre tâches de saisie proposées (saisie debout ou couchée, avec une cible à 20 ou 40 degrés de distance en terme de position articulaire du bras manipulateur). Le nombre de répliques fut ajusté durant les expériences, passant progressivement de 10 à 6. Les quatre tâches expérimentales étaient répétées pour chacun des 8 traitements étudiés.

Avant chaque essai, la scène apparaissait à l'écran, suivie d'un compte à rebours de trois secondes constitué de trois bips sonores consécutifs utilisé pour capter l'attention du sujet et l'avertir du commencement imminent de la tâche de saisie.

Pour contrebancer les effets d'apprentissage, l'ordre d'assignation des traitements fut balancé entre les sujets, de manière à ce qu'aucun traitement ne soit avantage par rapport à un autre.

En outre, les essais se déroulaient de façon automatique, excepté lors du changement d'interface matérielle. L'expérimentateur n'avait donc pas à intervenir, mais restait disponible dans un local adjacent au banc d'essai lors du déroulement des essais, pour répondre aux questions éventuelles des sujets. L'acquisition des données s'effectuait automatiquement par le simulateur et celles-ci étaient sauvegardées pour une analyse ultérieure.

Finalement, les sujets étaient filmés et leurs commentaires furent recueillis tout au long de l'expérience à la suite de quoi un questionnaire leur était administré à la fin de l'expérience. Ce questionnaire visait à évaluer la satisfaction et à recueillir tout commentaire concernant le banc d'essai, l'expérience et la procédure expérimentale.

#### 4.1.3 Résultats

Cette étude-pilote a permis de déterminer le nombre optimal de pratiques et de répliques à utiliser pour chacun des traitements utilisés.

Ainsi, suite à des ajustements itératifs, nous avons trouvé un bon compromis entre une durée d'expérimentation raisonnable et un nombre d'essais suffisant pour obtenir des résultats expérimentaux scientifiquement valables. Ce compromis est le suivant:

Pour chacun des huit traitements étudiés (voir tableau 4.1), chaque sujet exécute d'abord une pratique pour lui permettre de se familiariser avec les dispositifs de commande, le mode de commande et la fonction de gain utilisée. Par la suite, chaque sujet exécute la tâche de saisie avec soit un arbre debout ou un arbre couché, avec à chaque fois deux distances de cible. Pour chacune des quatre combinaisons possibles de tâche et de distance de cible, le sujet exécute six répliques successives de la tâche de saisie.

Chaque sujet exécute ainsi 25 essais (1 pratique + 4x6 répliques) pour chacun des 8 traitements testés, pour un total de 200 essais par sujet. La durée moyenne de l'expérience, incluant la préparation et le questionnaire à la fin, correspond alors à 1 h 45 min par sujet, ce qui équivaut à la durée jugée raisonnable par les sujets de l'étude-pilote.

#### 4.2 Essais principaux

##### 4.2.1 Objectifs

Cette série d'essais vise à comparer la performance et la satisfaction des opérateurs novices obtenues avec différentes interfaces de commande lors de la réalisation de tâches de saisie. Les interfaces de commande utilisées (décris au tableau 4.1) sont construites à partir de différentes combinaisons de dispositifs de commande, de modes de commande et de fonctions de gain.

## 4.2.2 Méthodologie

La méthodologie utilisée est la même que pour l'étude-pilote (section 4.1.1) à l'exception des points suivants qui diffèrent ou ont été raffinés suite à celle-ci:

### 4.2.2.1 Sujets

Au total, 12 sujets volontaires, 6 hommes et 6 femmes, âgés de 22 à 40 ans, dont 11 droitiers et un gaucher ont participé à l'expérience. Ils étaient tous des employés ou des étudiants boursiers du CRIM et possédaient une scolarité collégiale ou universitaire. Aucun d'entre eux n'avait d'expérience antérieure du genre de tâche à accomplir, que ce soit sur simulateur ou sur machine forestière. Ils possédaient tous une vision parfaite ou corrigée et n'avaient pas de déficience au niveau moteur.

### 4.2.2.2 Système

Suite à une mise à jour du système informatique du banc d'essai, nous avons pu ajouter des éléments de texture et d'ombrage au simulateur graphique dans le but d'améliorer la perception de la profondeur (voir figure 3.4). Nous avons également corrigé une erreur concernant la taille de la zone de saisie pour qu'elle corresponde à la définition donnée au taux d'erreur (section 3.3.2). En effet, l'étude-pilote a permis de déceler une erreur de programmation qui gonflait artificiellement le taux d'erreur suite à la définition d'une zone de saisie trop petite.

### 4.2.2.3 Procédure expérimentale

La procédure expérimentale suivie est la même que celle établie pour l'étude-pilote (section 4.1.2.7). Les essais se sont déroulés au CRIM, du 25 au 29 août 1997. Les sujets étaient isolés dans un bureau fermés lors des essais et pouvaient en tout temps demander de l'aide à l'expérimentateur qui les observaient discrètement à partir du local adjacent.

L'ordre d'assignation des traitements fut balancé pour contrebalancer les effets d'apprentissage. Ainsi, la moitié des sujets commençaient les essais avec le palonnier comme dispositif de commande, tandis que les autres débutaient avec les deux manettes de commande. De même, les modes de commande utilisés et les fonctions de gain étaient balancés également entre les participants. Finalement, la moitié des sujets (ceux identifiés par un nombre impair au tableau 4.2 qui suit) débutaient avec une cible située à une distance angulaire de 20 degrés par rapport à la position articulaire de départ de chacune des articulations du bras manipulateur, tandis que les autres sujets (ceux identifiés par un nombre pair) débutaient avec une cible située à 40 degrés des positions articulaires de départ du bras manipulateur.

À noter que l'ordre des tâches était le même pour tous les sujets, ceux-ci devaient d'abord saisir un arbre debout (2 distances x 6 répliques), pour ensuite saisir un arbre couché par terre (2 distances x 6 répliques). Cet ordre ne fut pas balancé, car l'objectif de cette étude comparative n'était pas d'étudier l'effet de la tâche sur la performance, mais plutôt d'étudier la performance obtenue par différentes interfaces de commande lors de la réalisation de différentes tâches.

Le tableau 4.2 ci-après résume l'ordre dans lequel se sont déroulés les essais pour les différents sujets. Les traitements (interfaces de commandes) utilisés, représentés par un code de trois lettres, sont en fait les traitements 1 à 8 du tableau 4.1. Nous utilisons cependant un code à lettre pour éviter l'inconvénient d'avoir à référer au tableau 4.1.

**Tableau 4.2** Assignation des traitements selon les sujets

Sujets	Ordre d'essai des traitements selon les sujets							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	M/A/L	M/Y/L	P/C/L	P/C/E	P/Y/L	P/Y/E	P/T/L	P/T/E
2	M/A/L	M/Y/L	P/Y/L	P/Y/E	P/C/L	P/C/E	P/T/E	P/T/L
3	M/A/L	M/Y/L	P/T/L	P/T/E	P/C/E	P/C/L	P/Y/E	P/Y/L
4	M/Y/L	M/A/L	P/C/E	P/C/L	P/T/E	P/T/L	P/Y/L	P/Y/E
5	M/Y/L	M/A/L	P/Y/E	P/Y/L	P/T/L	P/T/E	P/C/L	P/C/E
6	M/Y/L	M/A/L	P/T/E	P/T/L	P/Y/E	P/Y/L	P/C/E	P/C/L
7	P/C/L	P/C/E	P/T/E	P/T/L	P/Y/E	P/Y/L	M/A/L	M/Y/L
8	P/C/E	P/C/L	P/Y/E	P/Y/L	P/T/E	P/T/L	M/A/L	M/Y/L
9	P/Y/L	P/Y/E	P/C/E	P/C/L	P/T/L	P/T/E	M/Y/L	M/A/L
10	P/Y/E	P/Y/L	P/T/E	P/T/L	P/C/E	P/C/L	M/A/L	M/Y/L
11	P/T/L	P/T/E	P/C/L	P/C/E	P/Y/E	P/Y/L	M/Y/L	M/A/L
12	P/T/E	P/T/L	P/Y/L	P/Y/E	P/C/E	P/C/L	M/Y/L	M/A/L

Légende: La combinaison d'interface est notée au format I/J/K où

I - Dispositif(s) de commande: deux manettes à 2 ddl (M) ou un palonnier à 4 ddl (P)

J - Mode de commande: articulaire (A), cartésien (C), cylindrique (Y) ou tangentiel (T)

K - Fonction de gain: linéaire (L) ou exponentielle (E)

Les sujets étaient soumis successivement aux 8 traitements retenus au tableau 4.1 et effectuaient à chaque fois 1 pratique, suivie de 6 répliques pour chacune des quatre combinaisons de tâche et de distance de la cible.

En résumé, on a donc:

- 8 traitements ou interfaces de commande (voir tableau 4.1);
- 1 pratique pour chaque traitement;
- 4 combinaisons de tâche et de distance de cible par traitement (2 tâches x 2 distances);
- 6 répliques à chaque combinaison de tâche et de distance de cible;
- total:  $8 \times (1 + 4 \times 6) = 200$  essais/sujet;
- durée: environ 105 minutes par sujet, soit 15 minutes pour la préparation (instructions et familiarisation avec le système) + 90 minutes pour la série d'essais, soit environ 25 s par essai.

#### **4.2.3 Analyse des résultats**

L'analyse statistique des résultats procède de la manière suivante:

##### **4.2.3.1 Prétraitement des données**

Pour chacun des sujets et pour chacun des 6 critères de performance:

Pour chacune des 2 tâches (saisie verticale ou horizontale) et des 8 traitements:

- calcul de la valeur moyenne du critère lors des essais réussis (sauf pour le taux d'erreur qui représente la proportion des essais non-réussis);
- calcul de la moyenne du critère pour les 2 distances;
- report de la valeur dans un tableau d'analyse (voir annexe 5).

##### **4.2.3.2 Analyse de la variance (ANOVA)**

Une fois le prétraitement des données terminé, nous avons effectué une analyse de la variance (test ANOVA [Wheeler, 1988]) pour chacun des six critères de performance et pour chaque tâche, dans le but de détecter, s'il y a lieu, une différence significative entre les résultats obtenus avec chacun des traitements.

S'il y a une différence significative à plus de 95% de niveau de confiance<sup>27</sup>, nous poursuivons les analyses à l'aide d'un test de comparaisons multiples pour déterminer où se situe la différence (voir section suivante), sans quoi nous arrêtons.

Le tableau 4.3 ci-dessous résume les résultats des analyses de la variance qui ont été effectuées. Pour le détail des calculs, consulter les tableaux d'analyse de la variance qui sont reportés à l'annexe 5.

**Tableau 4.3** Résultats des tests d'analyse de la variance

Critères de performance	Détection d'une différence significative à 95% entre les différentes interfaces de commande	
	Tâche 1 (saisie verticale)	Tâche 2 (saisie horizontale)
temps de mouvement	oui	oui
taux d'erreur	oui	oui
écart longitudinal	non	non
écart latéral	non	non
écart d'approche	oui	non
écart d'orientation	oui	oui

#### 4.2.3.3 Comparaisons multiples

Si le test ANOVA a détecté une différence significative entre les interfaces de commande à un niveau de confiance égal ou supérieure à 95%, alors:

---

<sup>27</sup> Nous avons choisi un niveau de confiance de 95% car c'est le plus communément utilisé pour des analyses de ce genre [Ott, 1984; Wheeler, 1988; Hicks, 1993; Shavelson, 1996; Montgomery, 1997].

a) Vérifier si la carte R (étendue) est en contrôle statistique (c'est-à-dire que les données ne sont pas trop dispersées), car autrement on ne peut pas estimer l'écart-type, ce qui est nécessaire pour procéder à la suite des analyses.

On vérifie la carte R de la manière suivante [Wheeler, 1988]:

$$UCL_R = D_4 \bar{R} \quad \text{et} \quad LCL_R = D_3 \bar{R} \quad \text{où}$$

$\bar{R}$  = moyenne de l'étendue des groupes comparés

$UCL_R$  = limite de contrôle supérieure de l'étendue

$LCL_R$  = limite de contrôle inférieur de l'étendue

$D_3$  = facteur de contrôle pour limite inférieure de l'étendue = 0,2831 (pour n=12)

$D_4$  = facteur de contrôle pour limite supérieure de l'étendue = 1,7169 (pour n=12)

Si la carte R est hors contrôle seulement pour un groupe, on élimine ce groupe et on fait l'estimation de l'écart-type avec les autres groupes si ceux-ci sont en contrôle statistique. On peut répéter la démarche plusieurs fois. Si la carte R est hors contrôle pour plus d'un groupe, il faut examiner si le processus de mesurage est adéquat.

b) Effectuer un test de comparaisons multiples par la méthode de Tukey aussi appelée "Honestly Significant Difference (HSD)".

Le choix de ce test en particulier parmi les différents tests de comparaisons multiples qui existent (tels que ceux de Duncan, Newman-Keuls ou Fisher) est relié à son conservatisme. Ainsi, même si les test de Newman-Keul et celui de Duncan en particulier sont plus puissants statistiquement parlant, nous croyons qu'il est généralement plus prudent d'être conservateur dans nos analyses.

Le test de comparaisons multiples de Tukey procèdent de la manière suivante [Wheeler, 1988]:

On compare 2 groupes à la fois (pour toutes les paires possibles, ici au nombre de 28). Si la différence entre la moyenne des 2 groupes est supérieure à la HSD, alors on peut dire que ces deux groupes diffèrent de façon significative. On calcule la HSD de la façon suivante:

$$HSD = g_{p,k,n} \frac{1}{\sqrt{n}} \frac{\bar{R}}{d_2^*} \quad \text{où}$$

P = probabilité d'erreur (le niveau de confiance = 1 - p) = 0,05

k = nombre de groupes comparés (des interfaces de commande dans ce-cas-ci) = 8

n = taille des groupes (nombre de sujets) = 12

$\bar{R}$  = moyenne de l'étendue des groupes comparés

v = nombre de degrés de liberté de la moyenne de l'étendue = 70

$d_2^*$  = facteur de correction du biais = 3,27

$g_{p,k,v}$  = valeur tirée d'une table de distribution de l'étendue de Student

= 4,41 dans notre cas

Autrement dit, si la différence entre la moyenne de deux groupes est supérieure à

$$HSD = 4,41 \frac{1}{\sqrt{12}} \frac{\bar{R}}{3,27} = 0,389 \bar{R} \text{ alors ces 2 groupes diffèrent significativement.}$$

Les résultats du test de comparaisons multiples de Tukey sont ensuite représentés sous forme d'un graphe linéaire où les moyennes des différents groupes sont alignées en ordre de grandeur et où les groupes qui ne diffèrent pas entre eux de façon significative sont reliés entre eux par une ligne. Autrement dit, deux groupent diffèrent de façon significative s'ils ne sont pas reliés entre eux par une ligne.

Voici donc les résultats des comparaisons multiples de Tukey, pour chacun des tests ANOVA positifs du tableau 4.3:

### Temps de mouvement

#### Tâche 1 (tige verticale)

$$\text{Carte R: } UCL_R = 1,7169 (34,40) = 59,06 \text{ s} \quad LCL_R = 0,2831 (34,40) = 9,74 \text{ s}$$

Après vérification des données (voir annexe 5) on constate que la carte R est hors contrôle seulement en ce qui concerne l'interface 1 (voir tableau 4.1 pour la correspondance). On recalcule donc la moyenne des étendues sur les autres groupes, ce qui donne:

$$\text{Carte R: } UCL_R = 1,7169 (29,15) = 50,05 \text{ s} \quad LCL_R = 0,2831 (29,15) = 8,25 \text{ s}$$

Cette fois-ci, on constate que l'interface 2 est hors contrôle. On élimine donc ce groupe et on répète encore une fois le processus pour arriver à:

$$\text{Carte R: } UCL_R = 1,7169 (23,11) = 39,68 \text{ s} \quad LCL_R = 0,2831 (23,11) = 6,54 \text{ s}$$

On constate maintenant que la carte R de ces groupes est sous contrôle. On peut donc procéder aux comparaisons multiples où:

$HSD = 0,389 (23,11 \text{ s}) = 8,99 \text{ s}$  on obtient donc le graphe linéaire suivant:

Interface	7	5	8	3	4	6	2	1
Moyenne	16,53	17,74	18,49	18,75	18,85	19,26	32,79	42,50

On constate qu'il y a une différence significative entre les interfaces 1 et 2 et le reste des interfaces. Ceci démontre que l'utilisation de la commande coordonnée et l'intégration des dispositifs de commande diminuent significativement le temps de mouvement.

### Tâche 2 (tige horizontale)

$$\text{Carte R: } UCL_R = 1,7169 (31,32) = 53,77 \text{ s} \quad LCL_R = 0,2831 (31,32) = 8,87 \text{ s}$$

Après vérification des données (voir annexe 5) on constate que la carte R est hors contrôle seulement en ce qui concerne l'interface 1. On recalcule donc la moyenne des étendues sur les autres groupes, ce qui donne:

$$\text{Carte R: } UCL_R = 1,7169 (24,90) = 42,75 \text{ s} \quad LCL_R = 0,2831 (24,90) = 7,05 \text{ s}$$

Cette fois la carte R est sous contrôle. On procède donc aux comparaisons multiples:

$HSD = 0,389 (24,90 \text{ s}) = 9,69 \text{ s}$  on obtient donc le graphe linéaire suivant:

Interface	3	5	7	4	6	8	2	1
Moyenne	11,59	13,84	14,12	14,70	15,87	17,10	26,75	32,49

On constate donc qu'il y a une différence significative entre l'interface de commande conventionnelle (1) et les autres, à l'exception de l'interface 2. Nous constatons également qu'il n'y a pas de différences significatives entre les interfaces de commande 3 à 8, qui utilisent un mode de commande coordonnée et un dispositif de commande à 4 ddl (le palonnier)

Ces résultats nous permettent de conclure que l'utilisation de la commande coordonnée combinée à l'utilisation du palonnier à 4 ddl permet de réduire de façon significative le temps de mouvement. On remarque également qu'il n'y a pas de différence significative entre les modes qui utilisent la commande coordonnée et le palonnier, peu importe la fonction de gain utilisée.

## Taux d'erreur

### Tâche 1 (tige verticale)

$$\text{Carte R: } UCL_R = 1,7169 (29,16\%) = 50,06\% \quad LCL_R = 0,2831 (29,16\%) = 8,26\%$$

Après vérification des données (voir annexe 5) on constate que la carte R est hors contrôle seulement en ce qui concerne l'interface 1. On recalcule donc la moyenne des étendues sur les autres groupes, ce qui donne:

$$\text{Carte R: } UCL_R = 1,7169 (24,99\%) = 42,91\% \quad LCL_R = 0,2831 (24,99\%) = 7,07\%$$

Cette fois la carte R est sous contrôle. On procède donc aux comparaisons multiples:

$$HSD = 0,389 (24,99\%) = 9,72\% \quad \text{on obtient donc le graphe linéaire suivant:}$$

Interface	7	8	4	5	6	3	2	1
Moyenne	4,2	5,6	6,3	6,3	6,9	7,7	11,1	15,3

On constate que l'interface 1 obtient le plus grand taux d'erreur et se différencie de façon significative des interfaces 7 et 8. On en déduit que la commande coordonnée tangentielle permet de réduire le taux d'erreur de façon significative.

Ce résultat surprenant à première vue peut s'expliquer par le fait que la commande coordonnée tangentielle engendre par définition des vitesses de déplacement tangentiel qui sont moindres que pour les autres modes de commande lorsqu'on ne travaille pas en périphérie du volume de travail, i.e. à bout de bras. Ce déplacement plus lent permet probablement une précision accrue par rapport aux autres modes, d'où ces résultats.

### Tâche 2 (tige horizontale)

$$\text{Carte R: } UCL_R = 1,7169 (46,86 \%) = 80,45 \% \quad LCL_R = 0,2831 (46,86 \%) = 13,27 \%$$

Après vérification des données (voir annexe 5) on constate que la carte R est sous contrôle. On procède donc aux comparaisons multiples:

$HSD = 0,389 (46,86 \%) = 18,2 \%$  on obtient donc le graphe linéaire suivant:

Interface	3	7	4	5	6	8	2	1
Moyenne	11,8	12,5	14,6	18,8	18,8	25,0	25,0	27,1

Ce résultat indique qu'il n'y a pas de différence significative entre les différentes interfaces, ce qui contraste avec le test ANOVA. Cela est dû au fait que le test de Tukey est plutôt conservateur et que l'ANOVA a détecté une différence significative, mais à une valeur proche du seuil de détection. D'ailleurs, en appliquant le test de comparaisons multiples de Duncan (qui est plus puissant), on constate une différence significative entre l'interface 1 et les interfaces 3 et 7 (voir annexe 9 pour le calcul du test de Duncan).

En y regardant de plus près, on constate également que le taux d'erreur est en moyenne beaucoup plus élevé que pour la tâche 1. Cela est dû à une erreur détectée après l'expérience concernant la détection des collisions entre l'outil de saisie et l'arbre lorsqu'on tente de saisir un arbre couché. En effet, les mouvements de la pince dans le plan horizontal ne créaient pas de collision entre la pince et l'arbre, réduisant d'autant le retour d'information normalement associé aux bruits de collision et permettant plus facilement de refermer la pince alors qu'elle n'était pas centrée sur la tige.

Malgré ce problème, il est intéressant de constater que c'est encore l'interface conventionnelle (1) qui obtient le taux d'erreur le plus élevé.

## Écart d'orientation

### Tâche 1 (tige verticale)

$$\text{Carte R: } UCL_R = 1,7169 (9,10) = 15,62^\circ \quad LCL_R = 0,2831 (9,10) = 2,58^\circ$$

Après vérification des données (voir annexe 5) on constate que la carte R est hors contrôle en ce qui concerne l'interface 2. On recalcule donc la moyenne des étendues sur les autres groupes, ce qui donne:

$$\text{Carte R: } UCL_R = 1,7169 (8,02) = 13,8^\circ \quad LCL_R = 0,2831 (8,02) = 2,27^\circ$$

Cette fois la carte R est sous contrôle. On procède donc aux comparaisons multiples:

$HSD = 0,389 (8,02^\circ) = 3,12^\circ$  on obtient donc le graphe linéaire suivant:

Interface	4	3	6	7	5	8	1	2
Moyenne	4,7	4,8	5,3	6,0	6,1	6,3	6,9	7,7

On constate que le test de Tukey ne détecte pas de différence significative entre les interfaces, ce qui contredit encore une fois l'analyse de la variance à cause du conservatisme de la méthode. Pour résoudre l'ambiguité, nous utilisons le test de Duncan qui démontre quant à lui que l'interface 2 diffère significativement des interfaces 3 et 4.

Il est intéressant de remarquer que les interfaces 3 et 4 correspondent aux interfaces en mode coordonnée cartésien (avec respectivement les fonctions de gain linéaire et exponentielle).

### Tâche 2 (tige horizontale)

$$\text{Carte R: } UCL_R = 1,7169 (4,36) = 7,49^\circ \quad LCL_R = 0,2831 (4,36) = 1,23^\circ$$

Après vérification des données (voir annexe 5) on constate que la carte R est hors contrôle en ce qui concerne l'interface 8. On recalcule donc la moyenne des étendues sur les autres groupes, ce qui donne:

$$\text{Carte R: } UCL_R = 1,7169 (3,84) = 6,59^\circ \quad LCL_R = 0,2831 (3,84) = 1,09^\circ$$

Cette fois la carte R est sous contrôle. On procède donc aux comparaisons multiples:

$HSD = 0,389 (3,84^\circ) = 1,49^\circ$  on obtient donc le graphe linéaire suivant:

Interface	4	3	6	1	7	5	8	2
Moyenne	1,5	1,7	3,6	3,7	3,9	4,0	4,1	4,8

Les interfaces 3 et 4 qui utilisent le mode de commande coordonnée cartésien se démarquent significativement des autres interfaces en obtenant une meilleure précision au chapitre de l'orientation.

Ce résultat montre clairement que le mode cartésien est supérieur aux autres modes en ce qui concerne la précision d'orientation lors de tâches de saisie horizontale. Il l'est également (mais à un niveau non significatif, sauf pour l'interface 2) pour la tâche de saisie verticale. Nous croyons que ces résultats sont dûs à l'orientation absolue de l'outil par rapport à la base du téléopérateur et non pas à cause des mouvements en X et Y que le mode cartésien permet. Cette conclusion provient du fait qu'au niveau des autres critères de performance, le mode cartésien a obtenu des résultats qui ne sont pas significativement meilleurs que les modes cylindrique ou tangentiel.

Cette conclusion suggère qu'il serait intéressant de tester les modes cylindrique et tangentiel avec une orientation absolue par rapport à la base du téléopérateur, contrairement à ce qui est utilisé présentement, tel qu'illustré à la figure 2.3.

### Écart d'approche

#### Tâche 1 (tige verticale)

$$\text{Carte R: } UCL_R = 1,7169 (0,030) = 0,0515 \text{ m} \quad LCL_R = 0,2831 (0,030) = 0,0085 \text{ m}$$

Après vérification des données (voir annexe 5) on constate que la carte R est hors contrôle en ce qui concerne l'interface 1. On recalcule donc la moyenne des étendues sur les autres groupes, ce qui donne:

$$\text{Carte R: } UCL_R = 1,7169 (0,026) = 0,0446 \text{ m} \quad LCL_R = 0,2831 (0,026) = 0,0074 \text{ m}$$

Cette fois la carte R est sous contrôle. On procède donc aux comparaisons multiples:

$$HSD = 0,389 (0,026 \text{ m}) = 0,0101 \text{ m} \quad \text{on obtient donc le graphe linéaire suivant:}$$

Interface	4	8	2	5	7	6	3	1
Moyenne	0,0052	0,0072	0,0083	0,0084	0,0103	0,0114	0,0121	0,0220

On remarque que l'interface conventionnelle (1) se démarque significativement des autres interfaces (à l'exception de l'interface 3) en obtenant le plus grand écart d'approche. Il n'y a pas de différence significative entre les autres interfaces.

Ce résultat démontre qu'il est plus difficile d'approcher de près un arbre debout à l'aide

d'une pince avec l'interface de commande conventionnelle qu'avec les interfaces en mode coordonnée, surtout lorsque ces dernières utilisent en plus un dispositif de commande à 4 ddl.

Il faut cependant relativiser l'importance de ce dernier critère de performance qu'est l'écart d'approche. En effet, ce critère représente la distance entre l'arbre à saisir et le fond de la pince. Cet écart est généralement petit en termes absolus (de l'ordre de quelques centimètres) tel qu'on peut le constater en regardant les moyennes obtenues avec les différentes interfaces.

Or, les outils de saisie utilisés par les téléopérateurs forestiers arrivent très bien à saisir correctement leur cible lors de la fermeture des pinces lorsqu'il y a un écart de positionnement aussi petit.

Il en va de même pour les écarts latéraux qui sont, eux aussi, relativement petits (toujours de l'ordre de quelques centimètres) et qui sont aisément compensés lors de la fermeture des outils de saisie utilisés par les téléopérateurs forestiers. De toute façon, en ce qui concerne ce dernier critère de performance, une valeur trop grande résulte en une erreur de saisie et donc en un taux d'erreur plus élevé.

Pour toutes ces raisons et comme aucune différence significative n'a été détectée entre les interfaces de commande au niveau de l'écart latéral, nous proposons à l'avenir de ne plus utiliser ces deux critères pour mesurer la performance des opérateurs.

La performance des opérateurs sera donc désormais mesurée à partir des quatre critères que sont: le temps de mouvement, le taux d'erreur, l'écart d'orientation et l'écart longitudinal.

#### 4.2.3.4 Satisfaction

Suite à l'expérience, chaque sujet devait évaluer son niveau de satisfaction à l'égard:

- 1) des deux interfaces de commande utilisant les manettes de commande;
- 2) des trois modes de commande coordonnée combinés au palonnier;
- 3) de l'utilisation du palonnier par rapport aux manettes de commande;
- 4) des deux fonctions de gain utilisées.

Le sujet devait ainsi indiquer l'ordre de préférence pour chacune des deux ou trois options indiquées ou indiquer qu'il ne voyait pas de différence.

Les résultats obtenus pour chacun de ces quatre points sont respectivement:

- 1) Tous les sujets ont préféré l'utilisation du palonnier à celle des deux manettes pour la commande du bras manipulateur.
- 2) Sept des douze sujets ne voyaient pas de différence entre les deux modes de commande utilisés avec les manettes (coordonné cylindrique vs articulaire), alors que les cinq autres sujets préféraient tous le mode coordonné cylindrique au mode articulaire.
- 3) Seuls trois des douze sujets ont noté une différence entre les trois modes de commande utilisé avec le palonnier (modes coordonnés cartésien, cylindrique et tangentiel). Chacun de ces modes a recueilli un des trois votes de préférence et à chaque fois le sujet ne voyait pas de différence entre les deux modes qui restaient.
- 4) Seuls deux des douze sujets ont évalué qu'il y avait une différence entre les deux fonctions de gain, leurs préférences étant opposées.

On constate donc que les commentaires exprimés concernant la satisfaction vont dans le même sens que la performance obtenue lors des essais. Ainsi,

- 1) De façon unanime, les sujets se sont dits satisfaits de la commande coordonnée combinée à l'utilisation d'un palonnier à 4 ddl.
- 2) Près de la moitié des sujets ont indiqué une différence de satisfaction entre l'utilisation de la commande coordonnée et celle de la commande articulaire et leur préférence va unanimement à la commande coordonnée.
- 3) Il n'y a aucune différence significative entre les niveaux de satisfaction des sujets concernant les différents modes de commande coordonnée.
- 4) Il n'y a aucune différence significative entre les niveaux de satisfaction des sujets à l'égard des deux fonctions de gains utilisées.

#### **4.2.4 Discussion**

À la lumière des travaux antérieurs dans le domaine (voir section 2.1.3), nous savions déjà que la commande coordonnée combinée au palonnier améliorait la performance des opérateurs novices; nos résultats vont dans le même sens. Nous avons de plus montré que l'intégration des 4 ddl commandés sur un seul dispositif de commande améliore la performance, et que l'usage exclusif de la commande coordonnée (sans l'intégration des commandes) améliore également la performance initiale des opérateurs novices, ce qui est nouveau.

En particulier, suite aux tests de comparaisons multiples, nous avons trouvé que:

- La commande coordonnée, peu importe l'interface matérielle utilisée, améliore de façon significative la performance initiale d'opérateur novices comparativement à l'interface de

commande conventionnelle (interface 1: commande articulaire en vitesse avec 2 manettes et fonction de gain linéaire) en ce qui a trait au temps de mouvement.

- L'intégration des 4 ddl commandés sur un seul dispositif de commande (le palonnier) diminue de façon significative le temps de mouvement.
- La commande coordonnée cartésienne diminue de façon significative l'écart d'orientation pour les tâches de saisie horizontales comparativement aux autres modes de commande.

Nous n'avons pas détecté de différence significative due à la fonction de gain. Cependant, une analyse de l'effet de cette variable par comparaison en bloc des interfaces 3, 5, 7, et 4, 6, 8 indique une tendance qui avantage (mais pas de façon significative) la fonction de gain linéaire.

En effet, on peut constater au tableau 4.4 une légère diminution du temps de mouvement et du taux d'erreur lorsqu'on utilise une fonction de gain linéaire plutôt qu'exponentielle et ce, peu importe la tâche. Veuillez noter que ce tableau compare en bloc les résultats des interfaces 3,5,7 et 4,6,8.

**Tableau 4.4** Résultats des fonctions de gain pour chacune des tâches.

critères de performance	tâche 1 (tige verticale)		tâche 2 (tige horizontale)	
	linéaire	exponentielle	linéaire	exponentielle
	# 3, 5, 7	# 4, 6, 8	# 3, 5, 7	# 4, 6, 8
temps de mouvement	17,67 s	18,87 s	13,18 s	15,89 s
taux d'erreur	6,1 %	6,3 %	14,4 %	19,5 %

Maintenant, en ce qui concerne les modes de commande coordonnée, une comparaison en bloc des interfaces 3,4; 5,6 et 7,8 ne donne aucune tendance aussi claire pour les même critères (tableau 4.5).

**Tableau 4.5** Résultats des modes de commande coordonnée pour chacune des tâches

critère de performance	tâche 1			tâche 2		
	cart. # 3, 4	cyl # 5, 6	tang. # 7, 8	cart # 3, 4	cyl # 5, 6	tang # 7, 8
temps de mouvement	18,80 s	18,50 s	17,51 s	13,15 s	14,86 s	15,61 s
taux d'erreur	7,0 %	6,6 %	4,9 %	13,2 %	18,8 %	18,8 %

À noter que les résultats obtenus à l'aide de la commande coordonnée tangentielle dépendent largement de la géométrie du bras manipulateur et en particulier de l'amplitude des mouvements articulaires permis. En effet, le mode de commande tangentiel est en fait le mode de commande cylindrique doublé d'une relation signal/vitesse uniforme tel qu'expliqué à la section 2.1.2. Or, un bras manipulateur possédant des amplitudes articulaires très élevées (de près de 180 degrés dans le cas d'un bras manipulateur à base d'articulations rotatives) obtiendra des performances limitées avec relation signal/vitesse uniforme, en raison d'une vitesse maximale plafonnée.

Le choix réel se limite donc aux modes cartésien et cylindrique. Dans ce cas-ci, la tendance avantage le mode cylindrique pour la tâche 1 et le mode cartésien pour la tâche 2. On doit donc s'appuyer sur d'autres facteurs que ces données pour faire un choix éclairé quant au mode de commande coordonnée à préconiser.

À ce sujet, un facteur intéressant à citer est le comportement des ces deux modes de commande coordonnée en périphérie du volume de travail du bras manipulateur. En effet,

étant donné la configuration des téléopérateurs forestiers, leur volume de travail est délimité par une surface de révolution autour de l'axe  $\theta_1$  du bras manipulateur (voir figure 1.3).

Pour cette raison, le mode cylindrique épouse naturellement la forme du volume de travail dans le plan horizontal, alors que ce n'est pas le cas du mode cartésien. Ainsi un mouvement cartésien qui se bute à l'enveloppe de travail s'arrêtera contre celle-ci, alors que le mode cylindrique permet plus naturellement de suivre le contour de cette enveloppe, grâce à la commande directe du déplacement selon  $\theta_1$ .

Une façon de contourner ce problème est d'utiliser un mode de contact glissant [Greenspan, 1997] où les composantes du déplacement qui ne sont pas bloquées par l'enveloppe de travail sont autorisées à être exécutées. Il en résulte une impression de glissement de l'outil le long de l'enveloppe de travail. Cependant, ce comportement contredit dans un certain sens la définition même du mode de commande utilisé en permettant des déplacements dans une direction différente de celle indiquée par l'opérateur.

Pour ces raisons, nous recommandons de laisser en autant que possible le choix à l'opérateur entre les modes cylindrique et cartésien, tout en privilégiant le mode cylindrique en l'absence de choix.

Finalement, un autre facteur dont nous n'avons pas tenu compte jusqu'ici est la dépense énergétique engendrée par chacun de ces modes. Pour pouvoir étudier ce facteur et pour permettre entre autres de valider dans la réalité les résultats obtenus sur simulateur, des essais comparatifs d'interfaces de commande ont eu lieu sur un téléopérateur réel.

### 4.3 Validation des résultats sur le terrain

Les résultats présentés dans ce chapitre ont permis d'identifier la combinaison de variables indépendantes qui optimise la performance des sujets novices. Des essais sur un

téléopérateur réel, effectués en parallèle dans le cadre du projet ATREF ont tenté de s'assurer que les résultats obtenus sur le simulateur graphique 3D sont toujours valides sur un téléopérateur réel.

Rappelons que ces résultats démontrent que l'utilisation d'un mode de commande coordonnée combiné à un dispositif de commande à 4 ddl intégré (le palonnier) améliore la performance des opérateurs. Suite à une étude comparative sur simulateur, nous recommandions également de privilégier un mode de commande cylindrique et une fonction de gain linéaire.

Voyons d'abord la méthodologie utilisée pour l'étude comparative sur téléopérateur réel. Il est important de spécifier que ces essais n'ont pas été réalisés par l'auteur, mais par d'autres membres du projet ATREF.

#### 4.3.1 Méthodologie

Les essais sur le téléopérateur réel se sont déroulés en deux temps. Ainsi les deux premières séries d'essais visaient à comparer la performance obtenue grâce à l'interface de commande conventionnelle (mode articulaire avec deux manettes de commande et fonction de gain linéaire, traitement 1 du tableau 4.1) par rapport à l'interface en mode cylindrique avec palonnier à 4 ddl et fonction de gain linéaire (traitement 5 du tableau 4.1). Puis, suite aux résultats obtenus lors de ces deux séries d'essais sur le téléopérateur réel et en considérant plusieurs facteurs reliés à la commercialisation du produit, une troisième série d'essais fut effectuée. Elle a permis de comparer la performance obtenue grâce à l'interface conventionnelle par rapport à l'interface en mode cylindrique qui utilise deux manettes de commande à 2 ddl et une fonction de gain linéaire (traitement 2 du tableau 4.1).

Bien que nous reprenions ici l'essentiel des résultats, se référer aux rapports produits suite à ces essais [Frenette, 1997; Desrochers, 1998] afin d'obtenir plus d'informations sur la

méthodologie et les résultats obtenus lors des essais sur le terrain

#### **4.3.1.1 Tâche**

Tout comme pour les essais sur simulateur, la tâche consistait à aller saisir une tige verticale à une certaine hauteur et selon une certaine orientation. Les tiges étaient représentées par des poteaux de téléphones plantés dans le sol, à portée de saisie du bras manipulateur.

Initialement, l'outil reposait sur une plaque située par terre devant le téléopérateur. Au signal, l'opérateur devait saisir les tiges une à une, selon une certaine orientation et à une certaine hauteur indiquée par une bande de couleur. Pour compléter une saisie, il fallait refermer au complet la pince de l'outil. Il fallait ensuite relâcher la tige et revenir déposer l'outil sur la plaque de départ, selon la pose initiale et repartir pour la tige suivante. Le critère de performance était le temps d'exécution de la tâche au complet, chronométré à l'aide d'une planche à chronomètres. L'opérateur devait effectuer une bonne saisie avant de poursuivre l'exercice.

#### **4.3.1.2 Sujets**

Les sujets étaient tous des hommes, âgés entre 20 à 59 ans. Ils étaient classés selon leur expérience de commande avec ce type de téléopérateur, allant de novice (aucune expérience) à junior (expérience de base) à expert (plusieurs années d'expérience).

Quatre sujets (deux juniors et deux experts) ont participé à la première série d'essais. Trois sujets juniors ont participé à la deuxième série d'essais. Finalement, huit sujets (deux novices, deux juniors et quatre experts) ont participé à la troisième série d'essais.

#### **4.3.1.3 Système**

Le téléopérateur utilisé était un porteur modifié, instrumenté et équipé d'un ordinateur de

bord permettant l'utilisation de la commande coordonnée cylindrique avec fonction de gain linéaire. À noter que le simulateur utilisait une réplique virtuelle de ce téléopérateur et que conséquemment, la comparaison était justifiée.

Les tiges verticales étaient représentées par neuf poteaux de téléphone plantés dans le sol et qui avaient une tige aérienne variant de 3,6 à 5,2 m et un diamètre de 24 à 34 cm au niveau du sol. Ils étaient tous plantés à l'intérieur du volume de travail du bras manipulateur.

Les tiges étaient divisées en trois niveaux de 45 cm peints de différentes couleurs: rouge, bleu et noire. Les niveaux étaient séparés d'une zone tampon de 30 cm entre eux et une zone tampon de 15 cm séparait le premier niveau du sol. Les couleurs étaient appliquées aux niveaux de façon aléatoire, mais chaque poteau possédait les trois couleurs.

#### 4.3.1.4 Procédure expérimentale

Typiquement, deux sujets participaient aux essais et ce, durant deux jours consécutifs. En général, une seule interface de commande était utilisée aux cours de la même journée, de sorte que l'interface de commande était modifiée pour les essais du jour suivant.

Des exercices de réchauffement précédaient les tâches de saisie. Les essais étaient conçus pour être exécutés en moins de quatre heures par les opérateurs les plus lents. Une période de deux heures était prévue pour les exercices de réchauffement et une autre période de deux heures pour les tâches de saisie. De cette façon, deux opérateurs pouvaient être utilisés en alternance au cours d'une même journée. De façon générale, l'avant-midi était consacré aux exercices de réchauffement et l'après midi aux tâches de saisie. Donc, un sujet ne passait pas plus de deux heures consécutives aux commandes du téléopérateur.

L'ordre d'assignation des interfaces de commande était balancé entre les sujets et selon leur expérience, de sorte que la moitié des sujets d'un certain niveau d'expérience débutait avec

une interface et l'autre moitié avec l'autre interface (sauf dans la deuxième série d'essais, car le nombre de sujets était impair).

Lors des tâches de saisie, on remettait une feuille au sujet qui indiquait l'ordre dans lequel il devait saisir les poteaux et la hauteur; i.e. la couleur de la bande, qu'il devait saisir. L'ordre des poteaux et des couleurs était aléatoire, mais chaque poteau devait être saisi au moins une fois.

En tout, 15 séries aléatoires de 9 saisies étaient inscrites pour chaque sujet. Un temps d'arrêt de 30 secondes était prévu entre chaque série et une pause de 3 à 5 minutes était prévue après chaque groupe de 5 séries. En tout, chaque sujet complétait donc 135 tâches de saisie.

Les essais expérimentaux se sont déroulés du 2 juillet au 3 août 1997 dans une carrière de sable de l'Atelier-École les Cèdres, située dans la municipalité de Les Cèdres au Québec.

### **4.3.2 Résultats**

Les résultats obtenus pour chacune des trois séries d'essais sont décrits dans les sous-sections qui suivent.

#### **4.3.2.1 Première série d'essais**

Un mauvais ajustement hydraulique pour la rotation de l'axe  $\theta_1$ , rendait la commande trop nerveuse en créant des démarriages et des arrêts trop rapides, ce qui nuisait considérablement à la manipulation de la tête et à la fluidité des mouvements.

Suite à l'ajustement de ce problème, l'amélioration du comportement de la machine fut tel que les résultats obtenus lors de cette première série d'essais ont été mis de côté et deuxième série d'essais a été réalisée.

#### 4.3.2.2 Deuxième série d'essais

Trois sujets juniors ont participé à cette seconde série d'essais. Cette fois les problèmes d'ajustements hydrauliques étaient résolus. Cependant, encore une fois, les résultats obtenus (voir annexe 10) n'étaient pas concluants, puisqu'ils n'ont pas démontré une différence significative de performance entre les deux interfaces de commande comparées.

Ainsi, bien qu'en moyenne l'interface cylindrique ait réduit de 5,6 % le temps de mouvement comparativement à l'interface cylindrique, une analyse de la variance ne révèle pas de différence significative entre les deux interfaces, même lorsque l'on considère un modèle mixte où les sujets ont un effet aléatoire [Ott, 1984] (annexe 10). Cela est dû à la grande variance des données due au biais de départ des sujets en faveur de l'interface conventionnelle (les opérateurs juniors avaient tous au moins un mois de pratique avec cette dernière). Également, plusieurs bris de poteaux de même que celui d'un boyau hydraulique ont perturbé les essais et occasionné des délais. Finalement, les sujets ont jugé que la disposition des touches de fonction sur l'interface avec palonnier à 4 ddl était plus difficile à utiliser que celle utilisée pour les manettes à 2 ddl.

Malgré les résultats obtenus, les sujets ont tous apprécié le mode cylindrique pour la facilité avec laquelle il permettait d'effectuer les mouvements verticaux et avant arrière. Ils ont toutefois trouvé le palonnier trop mou et la plage de commande pour la rotation de la tête, trop petite.

À ce sujet, il est important de noter que le palonnier utilisé était un prototype expérimental. Selon les sujets, il nécessiterait certaines modifications notamment au niveau de la rigidité de ses ressorts de rappel avant d'être jugé adéquat pour la commande des téléopérateurs forestiers.

#### 4.3.2.3 Troisième série d'essais

Huit sujets (4 experts, 2 juniors et 2 novices) ont participé à cette dernière série d'essais. Cette fois, il s'agissait de comparer l'interface conventionnelle à l'interface cylindrique mais avec deux manettes de commande.

Encore une fois, à cause du niveau d'expérience différent des sujets utilisés, les tests n'ont pas été en mesure de démontrer l'avantage d'une interface par rapport à l'autre [Desrochers, 1998]. Cependant, en observant les données recueillies par Desrochers [1998] on constate une réduction moyenne de 11% du temps de mouvement en faveur de l'interface cylindrique avec manettes.

Pour illustrer l'effet de l'expérience des sujets sur la performance, il est intéressant de remarquer que pour les novices, la réduction du temps de mouvement était de 18 %, tandis qu'elle était de 7% pour les juniors et de 6% pour les experts.

De plus, les opérateurs experts sont en moyenne plus rapides que les opérateurs novices. De même, à l'intérieur d'une série d'essais, on peut constater une réduction progressive du temps de mouvement due à la pratique. Par exemple, on constate que dans tous les cas les opérateurs étaient plus rapides lors de leur deuxième journée de test même si la moitié d'entre eux débutait avec chacune des deux interfaces.

Malgré tout, nous avons décidé de tester notre hypothèse 1) (p. 62) concernant l'efficacité de la commande coordonnée par rapport à la commande articulaire pour les sujets novices. Nous avons donc réalisé l'analyse de la variance sur les résultats des sujets novices (annexe 10). Cette façon de faire permet une comparaison plus juste des résultats obtenus sur simulateur à ceux obtenus sur un téléopérateur réel car dans les deux nous comparons maintenant la performance d'opérateurs novices. Les résultats de cette analyse démontrent une différence significative (à un niveau de confiance supérieur à 99 %) entre les deux

interfaces.

Finalement, en observant de plus près les résultats obtenus par les novices, on constate que le deuxième jour d'essai est toujours plus rapide que le premier. Comme l'ordre d'essai de chaque novice est différent, nous avons alors décidé d'effectuer une analyse de la variance en tenant compte de deux facteurs, soit l'interface de commande (A) et l'ordre d'essai des interfaces (B).

Cette analyse indique encore une fois une différence significative entre les deux interfaces ( $p<0,01$ ), avec une différence encore plus significative concernant l'interaction AB, qui est en fait l'effet de la pratique (annexe 10).

Ces résultats viennent donc valider les résultats obtenus sur simulateur avec en plus une correspondance surprenante. Ainsi, pour l'interface en mode cylindrique (interface 2 du tableau 4.1) la réduction moyenne du temps de mouvement était de 22,8 % sur simulateur (tâche de saisie verticale), alors qu'elle est de 18,3 % sur le téléopérateur réel.

En terminant, il est également intéressant de souligner que tous les sujets, autant les experts que les novices, ont préféré le mode cylindrique au mode articulaire.

#### **4.3.3 Discussion**

Les essais sur un téléopérateur réel ont permis de constater que les opérateurs préfèrent unanimement le mode de commande coordonné cylindrique au mode articulaire (interface conventionnelle). Ils ont également démontré, tout comme les essais sur simulateur, que la commande coordonnée avec deux manettes de commande à 2 ddl augmente la performance des opérateurs novices comparativement à l'interface de commande conventionnelle.

Ces essais ont également permis de constater une préférence des opérateurs pour une interface de commande en mode coordonné cylindrique avec deux manettes de commande

à 2 ddl plutôt qu'un seul palonnier à 4 ddl. Dans ce cas-ci, ce résultat contraste avec celui obtenu sur simulateur où les sujets préféraient l'interface avec palonnier.

Quelques facteurs peuvent expliquer cette contradiction apparente. Ainsi, les sujets utilisés lors de la comparaison sur téléopérateur réel étaient des opérateurs juniors contrairement aux sujets utilisés sur simulateur qui étaient novices. Ils avaient donc un biais en faveur de l'interface conventionnelle. De plus, les vibrations rencontrées dans la réalité peuvent avoir joué un rôle en défaveur du palonnier qui était moins rigide que les manettes de commande. En outre, la tâche de saisie utilisée sur le téléopérateur nécessitait l'utilisation de deux touches de fonction (ouverture et fermeture des pinces) contrairement à une seule pour la tâche de saisie sur simulateur (fermeture des pinces uniquement). Comme les opérateurs ont jugé que la disposition des touches était plus facile lors de l'utilisation des manettes, cette complexité supplémentaire de la tâche peut également avoir joué en défaveur de l'interface avec palonnier. Finalement, les bris survenus lors des essais avec le palonnier ont perturbé cette série d'essais (le deuxième) et occasionnés des délais, ce qui a été source de variance dans les données.

Les essais ont de plus mis en lumière les difficultés d'adaptation de la commande coordonnée sur un téléopérateur forestier typique conçu à l'origine pour la commande articulaire où l'on n'actionne généralement qu'une seule articulation à la fois contrairement à la commande coordonnée. En effet, les téléopérateurs actuels sont munis de moyens électrohydrauliques limités en ce qui concerne la capacité des pompes et il en résulte l'obtention d'une meilleure performance lorsqu'on commande une seule articulation à la fois. Heureusement, les téléopérateurs de nouvelle génération tendent de plus en plus à utiliser des accumulateurs hydrauliques qui permettent de compenser la demande pour les courtes périodes où plusieurs articulations sont actionnées en même temps.

Ainsi, bien que les essais sur le terrain indiquent que l'utilisation du mode cylindrique exige en moyenne une consommation énergétique 8 % plus élevée que l'utilisation du mode

articulaire (interface conventionnelle), il faut nuancer ce résultat.

En effet, les essais sur le terrain ont été réalisés sur un téléopérateur expérimental qui n'utilisait pas d'accumulateurs hydrauliques et qui par conséquent favorisait, du point de vue énergétique, la commande articulaire. Nous croyons que l'utilisation d'une technologie électro-hydraulique appropriée à la commande coordonnée devrait réduire l'écart de performance entre les deux modes de commande.

Idéalement, plus de sujets auraient dû participer aux essais sur le téléopérateur mais les partenaires du projet ATREF ont décidé de mettre fin à ces essais afin de réserver le temps et les ressources financières qui restaient pour adapter la commande coordonnée à un téléopérateur conventionnel de marque Komatsu [Frenette, 1998].

Pour conclure, les essais sur le terrain ont permis de constater que l'apprentissage était le facteur qui avait le plus d'influence sur la performance des opérateurs. Ce constat corrobore les résultats obtenus auparavant [Lawrence, 1993].

C'est principalement pour cette raison que nous avons planifié la prochaine série d'essais empiriques sur simulateur graphique 3D. Il s'agit en effet de vérifier l'effet de la pratique sur la performance des opérateurs. Ce sujet fait d'ailleurs l'objet de la première partie du chapitre suivant.

## CHAPITRE V - APPRENTISSAGE ET MODÈLE DE PERFORMANCE

Les essais effectués sur simulateur graphique au chapitre précédent et ceux effectués en parallèle sur le terrain dans le cadre du projet ATREF [Desrochers, 1998] ont corroboré les résultats obtenus précédemment [Lawrence, 1993; Clark, 1995] qui montrent que l'expérience de l'opérateur, donc l'apprentissage, est probablement le facteur qui influence le plus la performance en téléopération forestière. Nous ne pouvons donc modéliser la performance humaine sans tenir compte de ce facteur primordial.

Un autre facteur qui n'a pas été étudié jusqu'ici risque également d'affecter la performance des opérateurs. Il s'agit du rapport entre la taille de la cible (diamètre de la tige à saisir) et l'outil de saisie (la pince). En effet, on peut facilement imaginer qu'il est plus facile de saisir un arbre de petit diamètre (comparativement à la capacité de la pince) qu'un arbre de grand diamètre mais légèrement inférieur à la capacité de la pince.

Finalement, nous ne connaissons pas l'effet de la distance de la cible sur la performance car même si la loi de Fitts indique que le temps de mouvement augmente avec la distance, il faut rappeler que cette loi ne modélise la performance pour des tâches de pointage et non pas de saisie comme c'est le cas ici.

Pour répondre à toutes ces questions, nous avons réalisé deux séries d'essais avec le simulateur graphique, dans le but de développer et raffiner un modèle de performance qui tienne compte de ces facteurs dans l'éventualité où leur effet s'avère significatif.

Ces séries d'essais nous ont permis de tester la validité de la loi de la pratique et de la dernière hypothèse énoncée à la fin du chapitre 2 (hypothèse 5), à savoir que la performance est inversement proportionnelle au rapport de taille cible/pince.

Finalement nous avons vérifié les prédictions de la loi de Fitts, concernant l'effet de la distance sur la performance, mais cette pour des tâches de saisie.

## **5.1 Effet de la pratique et de la distance de la cible sur la performance**

L'objectif ici est de mesurer l'évolution de la performance humaine dans le temps au fur et à mesure que les opérateurs pratiquent et deviennent plus habiles à effectuer la tâche de saisie qui leur est demandée. On veut ainsi mesurer le taux de croissance de la performance et connaître, si c'est possible le niveau de performance maximal qui peut être atteint avec la pratique. Finalement, le deuxième et dernier objectif est de mesurer l'effet de la distance de la cible (mesurée dans l'espace articulaire du bras manipulateur) sur la performance.

### **5.1.1 Méthodologie**

La méthodologie utilisée est similaire à celle utilisée pour les essais du chapitre précédent. Pour cette raison, nous ne reprenons ici que les points importants de cette méthodologie. Pour plus de détails, se rapporter à la section 4.2.1.

#### **5.1.1.1 Tâches**

Les même tâches de saisie (tige verticale et tige horizontale) ont été utilisées. Pour alléger le texte, nous y ferons référence comme étant la tâche 1 (saisie d'une tige verticale) et la tâche 2 (saisie d'une tige horizontale).

#### **5.1.1.2 Sujets**

Un total de 11 hommes volontaires âgés de 19 à 41 ans, dont 10 droitiers et un gaucher, tous sans expérience d'opération sur téléopérateur à 4 ddl ont pris part à l'expérience. Ils avaient tous une vision parfaite ou corrigée et leur niveau de scolarité ne dépassait pas le collégial.

Les sujets étaient les étudiants d'une classe de formation en abattage et façonnage des bois, un cours donné au centre de formation professionnelle Mont-Laurier. Ce cours vise à initier les intéressés aux rudiments du métier d'opérateur de machines forestières utilisées pour la récolte en bois court, telles que les abatteuses-façonneuses et les porteurs. Les sujets étaient donc parfaitement représentatifs des opérateurs de téléopérateurs forestiers à 4 ddl.

#### **5.1.1.3 Système**

Une fois de plus, nous avons utilisé le simulateur graphique décrit au chapitre 3. Cependant, cette fois nous n'avons utilisé que l'interface de commande conventionnelle, c'est à dire un siège muni de deux manettes de commande à 2 ddl, un mode de commande articulaire en vitesse et une fonction de gain linéaire.

#### **5.1.1.4 Variables indépendantes**

Deux variables indépendantes ont été utilisées. La première est l'expérience des opérateurs (sur simulateur), mesurée selon le nombre de pratiques effectuées d'une tâche de saisie de tige (indépendamment du sens, horizontal ou vertical). Nous avons ainsi mesuré la performance des opérateurs à huit différents niveaux d'expérience, allant d'aucune pratique à 2452 pratiques (qui correspond à environ 25 heures de pratique). Le tableau 5.1 plus loin illustre bien ces niveaux.

Les sujets participaient tous à une formation sur le simulateur graphique pour apprendre à opérer le bras manipulateur. Le nombre de pratiques était ajusté pour que les séances de formation durent environ une heure par sujet. Ainsi, des sept premiers niveaux d'expérience, le premier correspond à l'expérience initiale (nulle) et les six autres correspondent à l'expérience acquise suite aux six premières séances de formation (qui étaient entièrement dédiées à la réalisation de tâche de saisies). Finalement, le dernier niveau d'expérience a été mesuré à la fin de la formation, alors que les sujets avaient effectué 2452 pratiques de la

tâche de saisie.

La deuxième variable indépendante est la distance de la cible. Deux distances de cible ont été utilisées, soit 20° et 40° entre la position initiale et la position finale désirée pour chacune des articulations du bras manipulateur, comme ce fut pour les essais précédents.

#### **5.1.1.5 Variables dépendantes**

Suite aux résultats obtenus au chapitre précédent, nous retenons les quatre critères de performance suivants (se référer à la section 3.3.2 pour la définition de ceux-ci):

- temps de mouvement;
- taux d'erreur;
- écart longitudinal;
- écart d'orientation.

#### **5.1.1.6 Variables de contrôle**

En plus des variables de contrôle énumérées à la section 4.1.2.6, l'interface de commande utilisée était toujours la même, à savoir l'interface de commande conventionnelle. Cette dernière est définie par l'utilisation de deux manettes à 2 ddl comme dispositifs de commande, du mode de commande articulaire et d'une fonction de gain linéaire.

#### **5.1.1.7 Procédure expérimentale**

Les sujets étaient tous informés de l'objectif de l'expérience, à savoir étudier l'évolution de leur performance en fonction du nombre de pratiques. La durée des essais pour chaque niveau d'expérience était d'environ 10 minutes pour les 25 essais. L'expérience totale s'est déroulée sur une période de 3 semaines consécutives débutant le 21 mai 1998.

Pour contrebalancer l'effet d'apprentissage, quatre séries de traitements sont formées à partir des combinaisons des tâches et des distances de cibles. La moitié de ces séries débutent avec la tâche 1 et l'autre moitié avec la tâche 2 et à chaque fois, la moitié débute avec la distance de 20° et l'autre avec la distance de 40° tel qu'illustré au tableau 5.1 ci-dessous.

**Tableau 5.1** Assignation des traitements selon les séries

Série de traitement	Tâche 1 (tige verticale)		Tâche 2 (tige horizontale)	
	Distance 20°	Distance 40°	Distance 20°	Distance 40°
1	1°	2°	3°	4°
2	2°	1°	4°	3°
3	3°	4°	1°	2°
4	4°	3°	2°	1°

L'ordre d'assignation des séries de traitements est ensuite balancé entre les sujets pour chacun des niveaux d'expérience, encore une fois sur le principe d'un carré latin. Ainsi après les huit niveaux d'expérience, chaque sujet aura effectué deux fois chacune des séries de traitements du tableau 5.1, mais dans un ordre différent de celui- des autres. L'ordre d'assignation des séries de traitements est illustré au tableau 5.2 qui suit.

**Tableau 5.2** Ordre d'assignation des séries de traitements

Sujet	Niveau d'expérience (nombre de pratiques)							
	1 (13)	2 (181)	3 (349)	4 (517)	5 (685)	6 (917)	7 (1149)	8 (2452)
1	2	1	3	4	2	1	3	2
2	1	2	4	3	1	2	4	1
3	4	2	1	3	4	2	1	4
4	3	1	4	2	3	1	4	3
5	1	2	4	3	1	2	4	1
6	2	4	3	1	2	4	3	2
7	3	4	2	1	3	4	2	3
8	1	3	2	4	1	3	2	1
9	4	3	2	1	4	3	2	4
10	2	3	1	4	2	3	1	2
11	3	4	1	2	3	4	1	3

À noter que la position initiale du bras manipulateur et celles des cibles sont représentatives des situations travail rencontrées en téléopération forestière, celles-ci étant situées au centre de l'enveloppe de travail du bras manipulateur.

À chaque niveau d'expérience, les sujets effectuaient une pratique de réchauffement suivie de 6 répliques pour chacun des 4 traitements (2 tâches x 2 distances), pour un total de 25 essais par niveau d'expérience. Ils procédaient ensuite à une formation sur simulateur avec un certain nombre de pratiques où ils effectuaient des tâches de saisie semblables, ce qui leur permettait d'acquérir l'expérience nécessaire pour le prochain niveau d'expérience.

### **5.1.2 Analyse des résultats**

L'analyse statistique des résultats obtenus lors des différentes séries d'essais procède d'abord par un pré-traitement des données, suivi d'un tracé des graphes et d'une analyse de la variance.

On tente ainsi de détecter s'il y a une différence de performance significative selon le niveau d'expérience (mesuré par le nombre de pratiques) ou la distance de la cible.

Un modèle est ensuite développé lorsqu'on a détecté une différence significative.

#### **5.1.2.1 Prétraitement des données**

Pour chacun des quatre critères de performance et pour chacun des sujets, nous avons réalisé les opérations suivantes:

**Pour chacun des 32 traitements (8 niveaux d'expérience x 2 distances x 2 tâches):**

- calcul de la valeur moyenne du critère lors des essais réussis (excepté pour le taux d'erreur qui représente la proportion des essais non-réussis);
- report des valeurs calculées dans un tableau d'analyse (voir annexe 6).

### **5.1.2.2 Tracé des graphes et analyse de la variance (ANOVA)**

Pour chacun des critères de performance, les opérations suivantes ont été réalisées:

1) Pour chacune des deux tâches:

- tracé et analyse du graphe des moyennes de groupe pour les deux distances de cible;

2) Regroupement en bloc des données pour chacune des deux variables indépendantes (nombre de pratiques et distance de la cible).

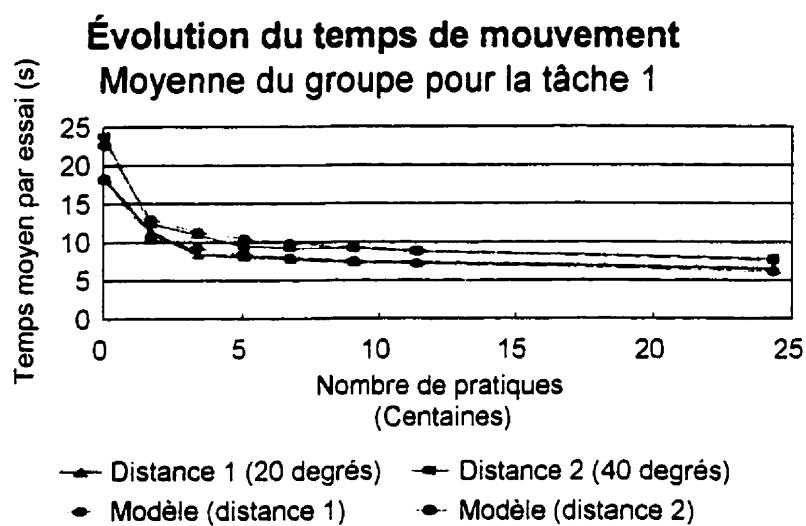
3) Analyse de la variance (ANOVA) pour vérifier si la variable indépendante a un effet significatif, à un niveau de confiance de 95% ou plus ( $p < 0,05$ ) sur le critère de performance étudié. Dans l'affirmative, poursuite des étapes 4 et 5.

4) Modélisation du critère de performance en fonction de la variable indépendante (s'il y a lieu d'un effet significatif).

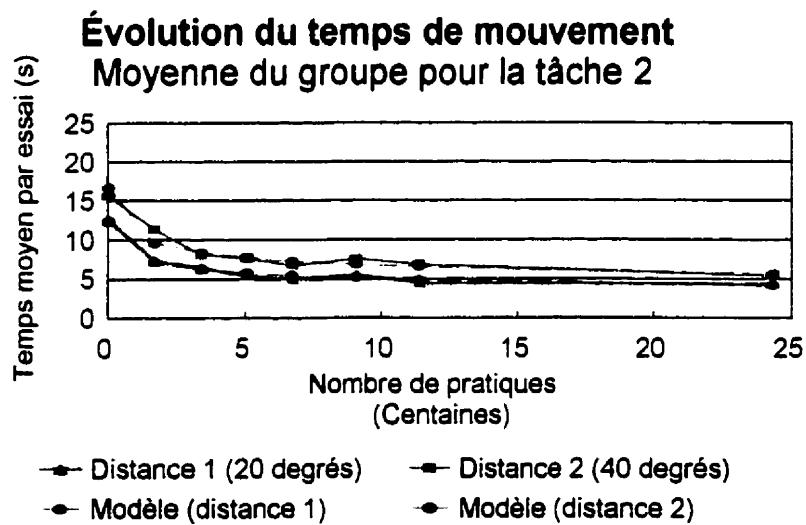
5) Test du modèle pour vérifier s'il est approprié et calcul du  $R^2$ .

### Temps de mouvement

Au niveau du temps de mouvement, les courbes obtenues à partir des données de l'annexe 6 sont les suivantes:



**Figure 5.1** Temps de mouvement vs pratique et distance (tâche 1)



**Figure 5.2** Temps de mouvement vs pratique et distance (tâche 2)

Ces deux graphiques permettent de constater une réelle évolution de la performance, c'est-à-dire une diminution du temps de mouvement avec le nombre de pratiques pour chaque tâche. On constate également une nette différence selon la distance de la cible. Ces constatations sont confirmées par les analyses de la variance qui indiquent que la pratique ( $F(7,80) = 20,40$ ) et la distance de la cible ( $F(1,20) = 4,35$ ) ont un effet significatif ( $p<0,05$ ) sur le temps de mouvement.

Cependant, cette différence n'est pas directement proportionnelle à la différence en distance. Ainsi, même si la distance passe du simple au double, le temps de mouvement n'augmente que d'environ 25%. Ce comportement suggère que le temps de mouvement n'est pas strictement proportionnel à la distance de la cible et qu'une composante majeure du temps de mouvement est liée non pas au déplacement de l'outil, mais à la saisie de la cible comme tel.

Finalement, on remarque que les temps de mouvement de la tâche 2 (tige horizontale) sont inférieurs à ceux de la tâche 1 (tige verticale).

### **Modélisation du temps de mouvement**

Contrairement à ce que laisse croire la loi de la pratique, le temps de mouvement ne peut tendre vers zéro avec un nombre de pratiques qui tend vers l'infini. Cependant, ce modèle est très utile pour un nombre de pratiques allant jusqu'à quelques milliers, ce qui, compte tenu des contraintes de temps de l'expérience, est amplement suffisant pour nos besoins.

Le tableau 5.3 qui suit présente les résultats des calculs des coefficients de la loi de la pratique à l'aide de la méthode des moindres carrés. On remarque une corrélation quasi-parfaite de la loi de la pratique (avec un coefficient d'apprentissage d'environ 0,21) avec les résultats du temps de mouvement.

**Tableau 5.3** Résultats de régression pour le temps de mouvement

Traitement	Coefficient d'apprentissage ( $\alpha$ )	Temps d'exécution initial ( $T_1$ )	Coefficient de détermination $R^2$
Tâche 1, distance 1 (20 degrés)	0,211	31,5	0,985
Tâche 1, distance 2 (40 degrés)	0,223	41,2	0,991
Tâche 2, distance 1 (20 degrés)	0,215	21,7	0,987
Tâche 2, distance 2 (40 degrés)	0,195	26,5	0,941

Ces résultats supposent un coefficient d'apprentissage différent pour chacun des quatre traitements utilisés. En supposant que le coefficient d'apprentissage soit le même d'une tâche à l'autre, et en recalculant le temps de mouvement initial à l'aide de la méthode des moindres carrés, on obtient les nouvelles valeurs suivantes:

**Tableau 5.4** Régression du temps de mouvement (coefficient d'apprentissage constant)

Traitement	Coefficient d'apprentissage ( $\alpha$ )	Temps d'exécution initial ( $T_1$ )	Coefficient de détermination $R^2$
Tâche 1, distance 1 (20 degrés)	0,21	31,3	0,985
Tâche 1, distance 2 (40 degrés)	0,21	38,8	0,982
Tâche 2, distance 1 (20 degrés)	0,21	21,2	0,987
Tâche 2, distance 2 (40 degrés)	0,21	28,5	0,931

Avec ce nouveau modèle, on constate que peu importe la tâche, l'augmentation du temps de mouvement lorsqu'on passe d'une distance de 20 à 40 degrés est de 7,5 s dans un cas et

de 7,3 s dans l'autre. Cela laisse supposer qu'une composante du temps de mouvement dépend directement de la distance de la cible et qu'en fait l'augmentation du temps de mouvement est de 7,4 s en moyenne (nous revenons sur ce point à la section 5.3). Pour l'instant, nous pouvons donc modéliser le tout de la manière suivante:

$$\text{Temps de mouvement} = T_1 n^\alpha \quad \text{où}$$

$$T_1 = \text{temps de mouvement initial (s)} = (7,4 * \max(\Delta\theta_i)/20 + 23,9) \text{ s} \quad (\text{tâche 1})$$

ou

$$(7,4 * \max(\Delta\theta_i)/20 + 13,8) \text{ s} \quad (\text{tâche 2})$$

$\Delta\theta_i$  = distance angulaire séparant la cible de la position initiale du bras manipulateur pour chacune de ses  $i$  articulations ( $i = 1 \dots 4$ )

$n$  = nombre de pratiques

$\alpha$  = coefficient d'apprentissage = 0,21

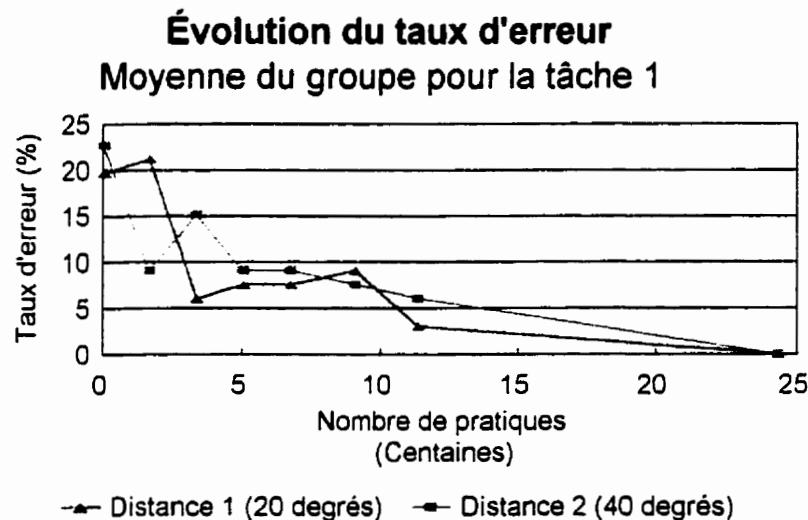
### Test du modèle

Un test F du modèle indique que celui-ci est approprié pour les deux tâches et les deux distances ( $p < 0,05$ ). Il obtient également un coefficient de détermination  $R^2$  égal ou supérieur à 0,93 ce qui est excellent puisque ça signifie que le modèle explique 93% de la variation du temps de mouvement moyen du groupe. L'ajustement du modèle aux données expérimentales est donc excellent tel qu'on peut l'observer sur les figures 5.1 et 5.2.

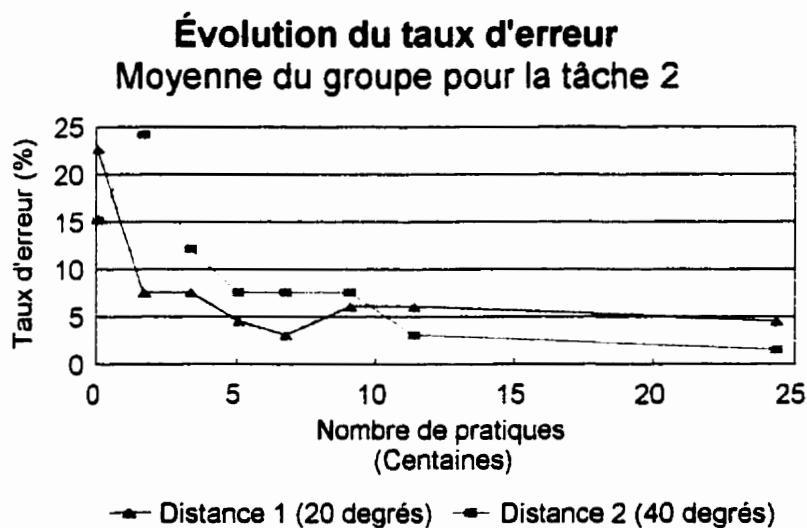
Pour avoir une idée de ce que cela signifie, il est intéressant de constater que la loi de Fitts, qui est probablement le modèle de performance le plus connu et le plus cité en ergonomie a obtenu un coefficient de détermination  $R^2$  variant entre 83 % et 95% lors des célèbres expériences de Card, English et Burr qui comparaient différents dispositifs d'entrée de données pour la sélection de texte [Card, 1978].

### Taux d'erreur

En ce qui concerne le taux d'erreur, les courbes obtenues à partir des données de l'annexe 6 sont les suivantes:



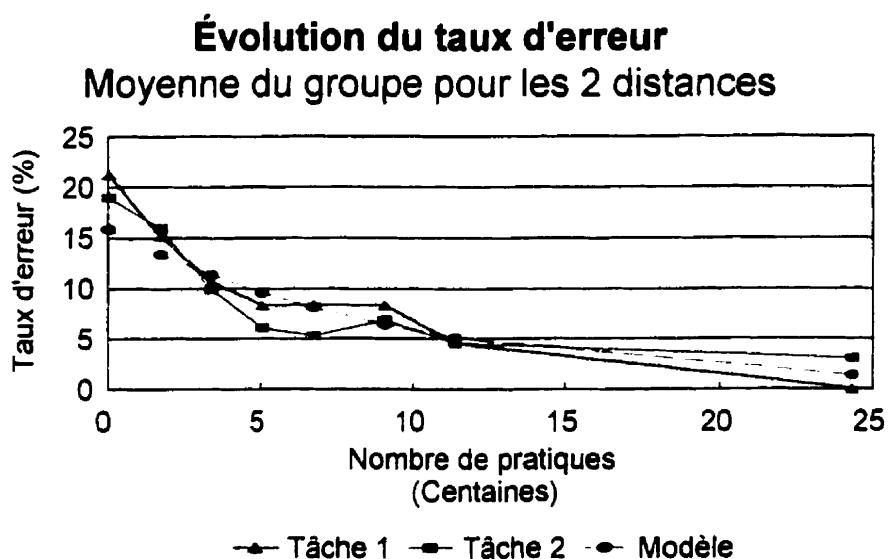
**Figure 5.3** Taux d'erreur vs pratique et distance (tâche 1)



**Figure 5.4** Taux d'erreur vs pratique et distance (tâche 2)

Comme on peut le constater sur les deux graphes précédents, seule la pratique a une influence significative sur le taux d'erreur ( $F(7,80) = 8,69; p<0,05$ ), la distance n'ayant de toute évidence aucun effet significatif sur ce critère ( $F(1,20) = 1,38; p>0,05$ ).

Comme la distance n'a pas d'effet significatif sur le taux d'erreur, nous allons d'abord calculer la moyenne du taux d'erreur pour les deux distances avant de modéliser l'effet de la pratique. Cela aura pour effet de lissage des données et de fournir une valeur plus précise du coefficient d'apprentissage, puisqu'il sera calculé sur un plus grand nombre d'essais. On obtient ainsi:



**Figure 5.5** Taux d'erreur vs pratique et tâche

Une fois de plus, un simple coup d'œil permet de constater que le type de tâche n'influence pas le taux d'erreur de façon significative ( $F(1,20) = 1,02; p>0,05$ ). Nous utiliserons donc la moyenne des deux tâches pour modéliser cette évolution.

## Modélisation du taux d'erreur

Comme la loi de la pratique est conçue pour modéliser le temps de mouvement d'une tâche et non le taux d'erreur, nous allons ajuster trois modèles de courbe sur les données expérimentales obtenues, soit un modèle linéaire, un modèle basé sur la loi de la pratique et un modèle exponentiel de la forme  $y = b \cdot c^n$ . Nous avons utilisé la méthode des moindres carrés pour obtenir les coefficients de régression des différents modèles. Nous obtenons ainsi les résultats suivants:

**Tableau 5.5** Ajustement des modèles pour le taux d'erreur

Modèle	Coefficient de régression	Coefficient de détermination R <sup>2</sup>
linéaire ( $y = d + e \cdot n$ )	$d = 14,2 \%$ ; $e = -0,0064$	0,675
loi de la pratique ( $y = TE_1 \cdot n^{-\alpha}$ )	$TE_1 = 41,6 \%$ ; $\alpha = 0,264$	0,814
exponentiel ( $y = b \cdot c^n$ )	$b = 16,0 \%$ ; $c = 0,999001$	0,870

Comme il obtient le coefficient de détermination le plus élevé, le modèle exponentiel est nettement supérieur au modèle basé sur la loi de la pratique. C'est donc ce modèle que nous retenons pour expliquer le taux d'erreur. Ses paramètres sont les suivants:

$$\text{Taux d'erreur} = b * c^n \quad \text{où}$$

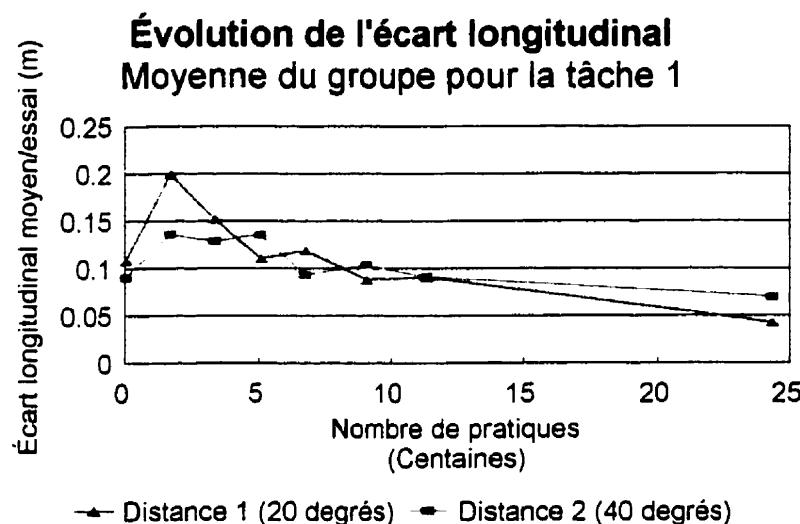
b, c = constantes déterminées expérimentalement n = nombre de pratiques

## Test du modèle

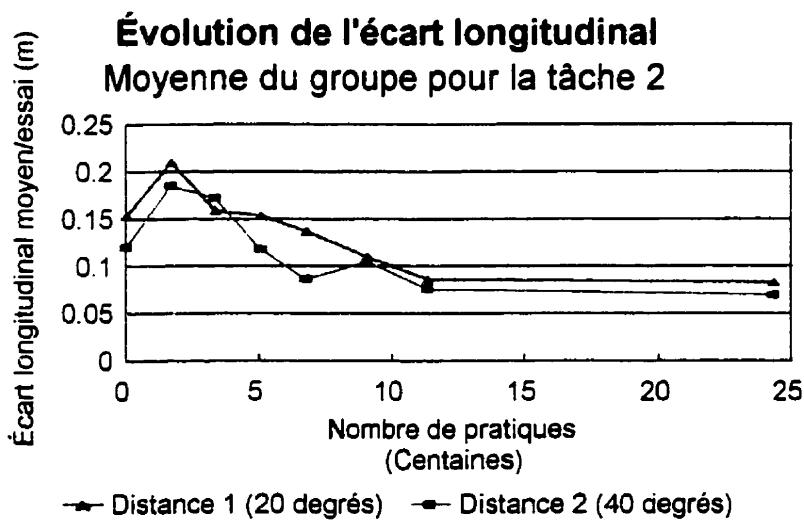
Un test F indique que notre modèle est approprié ( $F(8,79) = 65,99$ ;  $p < 0,05$ ) pour les deux tâches et les deux distances. Ce modèle est superposé aux données expérimentales à la figure 5.5.

## Écart longitudinal

En ce qui concerne l'écart longitudinal, les courbes obtenues expérimentalement sont:



**Figure 5.6** Écart longitudinal vs pratique et distance (tâche 1)

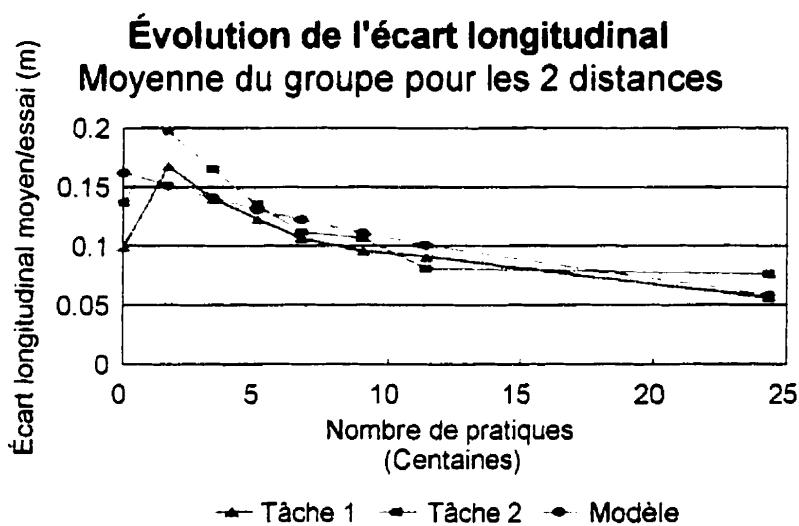


**Figure 5.7** Écart longitudinal vs pratique et distance (tâche 2)

Une analyse de la variance des résultats confirme que la distance de la cible n'a pas d'effet significatif sur l'écart longitudinal ( $F(1,20) = 1,50$ ;  $p>0,05$ ).

Encore une fois, pour lisser les courbes, nous calculons la moyenne de l'erreur longitudinale pour les deux distances, pour obtenir les courbes suivantes:

On constate, encore une fois, qu'il n'y a pas de différence significative entre les deux tâches ( $F(1,20) = 2,26$ ;  $p>0,05$ ). Nous utiliserons donc la moyenne des deux tâches pour modéliser l'évolution de l'écart longitudinal selon la pratique.



**Figure 5.8** Écart longitudinal vs pratique et tâche

Il est intéressant de noter une augmentation de l'écart longitudinal entre le premier et le deuxième niveau d'expérience (entre le premier et le deuxième groupe de données de la figure 5.8). Ce comportement étrange s'explique par le fait qu'au premier niveau d'expérience, il était bien expliqué aux sujets d'optimiser le temps de mouvement, le taux d'erreur, l'écart longitudinal et l'écart d'orientation. Cependant, par la suite les sujets semblaient plus préoccupés à optimiser le temps de mouvement et le taux d'erreur que l'écart longitudinal. Ce comportement peut s'expliquer par le fait qu'il y avait un retour d'information sur les deux premiers critères (visuel pour le temps de mouvement et sonore pour le taux d'erreur), alors qu'il n'y avait pas de retour d'information concernant l'écart longitudinal. Pour cette raison, nous allons modéliser l'écart longitudinal, mais sans tenir compte des données du premier niveau d'expérience.

### Modélisation de l'écart longitudinal

Voici les résultats obtenus lors de l'ajustement de différents modèles aux données expérimentales à l'aide de la méthode des moindres carrés.

**Tableau 5.6** Ajustement des modèles pour l'écart longitudinal

Modèle	Paramètres du modèle	Coefficient de détermination $R^2$
linéaire ( $y = d + e \cdot n$ )	$d = 0,158; e = 4,5 \times 10^{-5}$	0,735
loi de la pratique ( $y = EL_1 n^{-\alpha}$ )	$EL_1 = 0,511; \alpha = 0,224$	0,805
exponentiel ( $y = b \cdot c^n$ )	$b = 0,163; c = 0,999581$	0,823

On voit encore une fois que le coefficient d'apprentissage est plus élevé que pour le temps de mouvement (où  $\alpha = 0,21$ ), ce qui indique un apprentissage plus rapide. Cependant, comme pour le taux d'erreur, un modèle exponentiel semble légèrement plus approprié en raison d'un coefficient de détermination ( $R^2$ ) plus élevé. Nous utiliserons donc ce modèle car il explique mieux les variations de l'écart longitudinal du groupe.

### Test du modèle

Finalement, un test F indique que le modèle est approprié ( $F(8,79) = 45,91; p < 0,05$ ) pour les deux tâches et les deux distances.

On peut d'ailleurs le constater visuellement, puisqu'il est superposé aux données expérimentales à la figure 5.8.

## Écart d'orientation

En ce qui concerne l'écart d'orientation, les courbes obtenues expérimentalement sont:

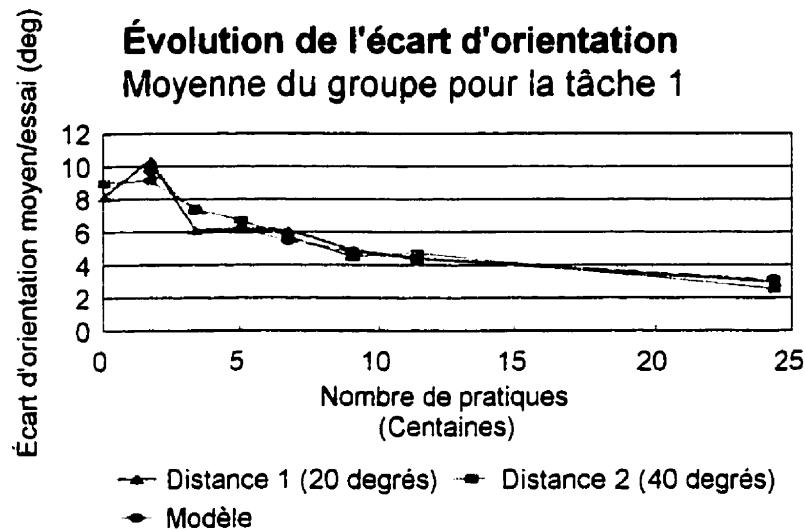


Figure 5.9 Écart d'orientation vs pratique (tâche 1)

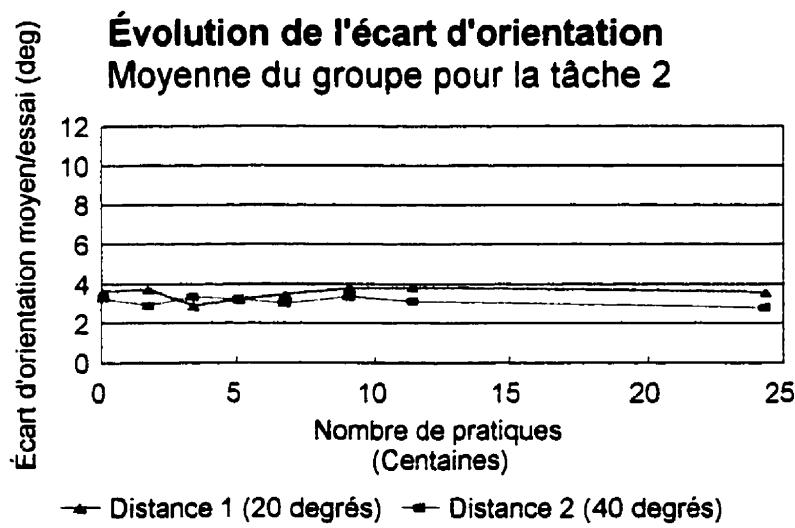


Figure 5.10 Écart d'orientation vs pratique (tâche 2)

On constate que pour les deux tâches, la distance n'a pas d'effet significatif ( $F(1,20) = 1,06$ ;  $p>0,05$ ) sur l'écart d'orientation et que dans le cas de la tâche 2, même la pratique n'a aucun effet significatif ( $F(7,80) = 1,21$ ;  $p>0,05$ ) sur l'écart d'orientation qui reste passablement constant à une valeur moyenne de 3,3 degrés.

Ce dernier résultat n'est pas surprenant, puisque pour la tâche 2, les écarts d'orientation supérieurs à 5 degrés résultent presque automatiquement en des erreurs de saisie, tout dépendant de la position de la pince, la tige n'étant pas située à l'intérieur des pinces du téléopérateur lors de leur fermeture.

Il est intéressant de noter une augmentation de l'écart d'orientation entre le premier et le deuxième niveau d'expérience. Ce comportement étrange s'explique (tout comme pour l'écart longitudinal) par le fait qu'au premier niveau d'expérience, il était bien expliqué aux sujets de minimiser le temps de mouvement, le taux d'erreur, l'écart longitudinal et l'écart d'orientation. Cependant, à partir du deuxième niveau d'expérience, les sujets semblaient plus préoccupés à optimiser le temps de mouvement et le taux d'erreur que les deux autres critères, en raison de retours d'information plus proéminents pour ces deux critères.

Pour cette raison, nous allons modéliser l'évolution de l'écart d'orientation en fonction du nombre de pratiques, sans tenir compte du premier niveau d'expérience (comme ce fut le cas pour l'écart longitudinal).

### **Modélisation de l'écart d'orientation**

L'ajustement des trois modèles précédents aux données expérimentales obtenues pour la tâche 1 (sauf pour le premier niveau d'expérience) à l'aide de la méthode des moindres carrés donne les résultats suivants:

**Tableau 5.7** Ajustement des modèles pour l'écart d'orientation

Modèle	Paramètres du modèle	Coefficient de détermination R <sup>2</sup>
linéaire ( $y = d + e \cdot n$ )	$d = 8,10; e = -0,00249$	0,745
loi de la pratique ( $y = EO_1 \cdot n^\alpha$ )	$EO_1 = 91,6; \alpha = 0,431$	0,974
exponentiel ( $y = b \cdot c^n$ )	$b = 8,536; c = 0,999510$	0,837

Ces résultats montrent clairement que la loi de la pratique modélise mieux l'évolution de l'écart d'orientation que les deux autres modèles. Nous pouvons donc conclure que l'écart d'orientation est très bien modélisé par un modèle semblable à la loi de la pratique, i.e.:

$$\text{Écart d'orientation} = EO_1 \cdot n^\alpha \quad \text{où}$$

$EO_1$  = écart d'orientation initial = 91,6 degrés

$n$  = nombre de pratiques

$\alpha = 0,431$

Le coefficient d'apprentissage nettement plus élevé que pour le temps de mouvement ( $\alpha = 0,431$  plutôt que 0,21) indique un apprentissage plus rapide. On constate qu'après environ 2500 pratiques (qui correspond au huitième niveau d'expérience utilisé ici), la moyenne du groupe tend vers un écart d'orientation de 3,1 degrés pour la tâche 1, une valeur comparable à celle obtenue pour la tâche 2. Il semble s'agir d'une valeur plancher difficile à diminuer. C'est de toute façon une précision suffisante pour le type de tâche visé ici.

### Test du modèle

Un test F indique que le modèle basé sur la loi de la pratique est approprié ( $F(8,79) = 370,91; p < 0,05$ ) pour modéliser l'évolution de l'écart d'orientation avec la pratique lors de la tâche 1, peu importe la distance de la cible. Le modèle est superposé aux données expérimentales à la figure 5.9.

### 5.1.3 Discussion

Les résultats obtenus montrent que la distance de la cible et le type de tâche n'ont un effet significatif que sur le temps de mouvement, tandis que l'écart d'orientation, tel que discuté précédemment (section 3.3.2) ne s'applique pas vraiment à la tâche 2 en raison d'un manque d'orthogonalité avec le taux d'erreur. En effet, pour la deuxième tâche, le taux d'erreur tient compte des écarts d'orientation trop élevés qui sont considérés comme des erreurs de saisie.

De plus, on remarque une amélioration significative de la performance suite à la pratique. La progression de la performance est bien modélisée par la loi de la pratique, sauf pour le taux d'erreur et l'écart longitudinal où un modèle exponentiel donne des résultats plus appropriés ( $R^2$  respectifs de 0,870 et 0,823 au lieu de 0,814 et 0,805 pour la loi de la pratique).

En ce qui concerne l'apprentissage, on constate que celui-ci s'effectue plus rapidement au niveau de l'écart d'orientation et du taux d'erreur que pour le temps de mouvement et l'écart longitudinal qui suivent une dynamique semblable et plus lente.

Il est également intéressant de constater que pour le temps de mouvement, la tâche 2 s'exécute plus rapidement que la tâche 1. Ce résultat surprenant peut s'expliquer par le fait que l'occlusion de la cible par l'outil du téléopérateur est plus grande pour la tâche 1 que pour la tâche 2.

Finalement, on remarque qu'un passage de la distance de la cible de 20 degrés à 40 degrés pour toutes les articulations du bras manipulateur augmente le temps de mouvement initial de 7,4 s, peu importe le type de tâche. Ce comportement semble indiquer qu'une partie du temps de mouvement est directement proportionnelle à la distance de la cible, peu importe le type de tâche. Nous revenons sur ce sujet à la section 5.3.

Pour l'instant, concentrons-nous sur l'effet d'un autre facteur déterminant pour la performance des opérateurs: le rapport de taille entre la cible et l'outil.

## 5.2 Effet du rapport de taille cible/outil sur la performance

Jusqu'ici, nous avons volontairement négligé d'étudier un autre facteur qui a vraisemblablement une influence déterminante sur la performance des opérateurs. Il s'agit du rapport de taille entre la cible (diamètre de la tige à saisir) et l'outil (la pince).

En effet, on peut aisément imaginer qu'une tige presque aussi grosse que la pince du téléopérateur sera plus difficile à saisir qu'une tige plus petite. C'est pourquoi nous allons maintenant tester la cinquième hypothèse énoncée à la fin du deuxième chapitre, soit:

- La performance des opérateurs est inversement proportionnelle au rapport de taille entre la cible (diamètre de la tige à saisir) et l'outil de saisie (la pince).

Pour y parvenir, nous avons effectué une autre série d'essais, en utilisant cette fois quatre cibles de diamètres différents, plutôt que d'utiliser deux types de tâches avec deux distances de cibles.

### 5.2.1 Méthodologie

La méthodologie utilisée est pratiquement la même que pour les essais précédents (section 5.1.1). Nous n'avons cependant utilisé que quatre niveaux d'expérience au lieu des huit utilisés précédemment. En fait, pour cette série d'essais, seuls les points suivants diffèrent de la méthodologie utilisée pour la série d'essais précédente:

### **5.2.1.1 Tâche**

Seule la tâche 1 (saisie d'un arbre debout) a été utilisée avec une seule distance de cible, soit 40° avec chacune des positions initiales des articulations. Nous utilisons cependant quatre cibles de diamètres différents, bien sûr toujours inférieurs à celui de la pince, pour permettre la saisie.

### **5.2.1.2 Sujets**

Un total de 11 hommes âgés de 20 à 49 ans, dont 10 droitiers et 1 gaucher ont participé à l'expérience. Ils avaient tous une vision parfaite ou corrigée et leur niveau de scolarité variait entre le secondaire 3 et le collégial. Les sujets participaient tous à un programme de formation pour devenir opérateur de machines forestières et aucun ne possédait d'expérience avec le type de tâche à réaliser. Aucun de ces sujets n'avait participé aux séries d'essais précédentes.

### **5.2.1.3 Variables indépendantes**

La variable indépendante, dans ce cas-ci est le rapport de taille cible/pince. Nous avons utilisé quatre rapports différents, résumés au tableau 5.8. À noter que comme la taille de la pince est constante, c'est la taille de la cible (le diamètre de la tige à saisir) qui varie.

### **5.2.1.4 Variables dépendantes**

Encore une fois, la variable dépendante est la performance humaine, mesurée à quatre différents niveaux d'expérience, soit après 13, 181, 349 et 517 pratiques de la tâche. Les quatre critères de performance utilisés sont toujours les mêmes, soit le temps de mouvement, le taux d'erreur, l'écart longitudinal et l'écart d'orientation.

### 5.2.1.5 Procédure expérimentale

Les sujets étaient tous informés de l'objectif de l'expérience, à savoir étudier l'effet du rapport de taille cible/pince sur l'évolution de leur performance dans le temps.

Pour contrebalancer l'effet de l'apprentissage, quatre séries de traitements sont formées à partir des quatre rapports de taille cible/pince, tel que résumé au tableau 5.8.

**Tableau 5.8** Assignation des rapports de taille cible/pince selon les séries de traitements

Série de traitements	Rapport de taille cible/pince			
	10%	25%	54% <sup>28</sup>	75%
1	1°	2°	3°	4°
2	4°	3°	2°	1°
3	2°	1°	4°	3°
4	3°	4°	1°	2°

L'ordre d'assignation des séries de traitements est ensuite balancé entre les sujets pour chacun des quatre niveaux d'expérience, sur le principe d'un carré latin. Ainsi après les quatre niveaux d'expérience, chaque sujet aura effectué une fois chacune des séries de traitements du tableau 5.8, mais dans un ordre différent de celui- des autres, tel qu'illustré au tableau 5.9 qui suit.

<sup>28</sup> Étant donné la taille fixe de la pince à 0,465 m, ce rapport de taille cible/pince correspond à un diamètre de tige de 0,250 m, soit le même diamètre que celui utilisé pour les expériences précédentes. L'objectif visé est de pouvoir comparer les résultats obtenus par les différents groupes de sujets dans les mêmes conditions.

**Tableau 5.9** Ordre d'assignation des séries de traitements

Sujet	Niveau d'expérience (nombre de pratiques)			
	1 (13)	2 (181)	3 (349)	4 (517)
1	2	4	1	3
2	4	3	2	1
3	3	2	1	4
4	1	4	3	2
5	1	3	2	4
6	3	2	4	1
7	4	1	3	2
8	2	1	3	4
9	4	2	1	3
10	1	4	2	3
11	3	1	4	2

À chaque niveau d'expérience, les sujets effectuaient une pratique de réchauffement suivie de six répliques pour chacun des quatre traitements (rapports de taille cible/pince), pour un total de 25 essais par niveau d'expérience. Ils procédaient ensuite à une formation sur simulateur avec un certain nombre de pratiques où ils effectuaient des tâches de saisie semblables, ce qui leur permettait d'acquérir l'expérience nécessaire pour le prochain niveau d'expérience.

La durée des essais pour chaque niveau d'expérience était d'environ dix minutes pour les 25 essais. Les essais se sont déroulés du 22 au 24 juin 1998.

### 5.2.2 Analyse des résultats

L'analyse des résultats procède de la même manière que pour les essais précédents (voir section 5.1.2), puisque seule la variable indépendante diffère.

Les données expérimentales recueillies sont présentées à l'annexe 7.

#### Temps de mouvement

Une analyse de la variance ne détecte aucune différence significative du temps de mouvement selon le rapport de taille cible/pince utilisé ( $F(3,40) = 1,32; p>0,05$ ).

De plus, une modélisation selon la loi de la pratique (diamètre de cible = 0,250) nous donne les résultats suivants:

$$\text{Temps de mouvement} = T_1 n^\alpha \quad \text{où}$$

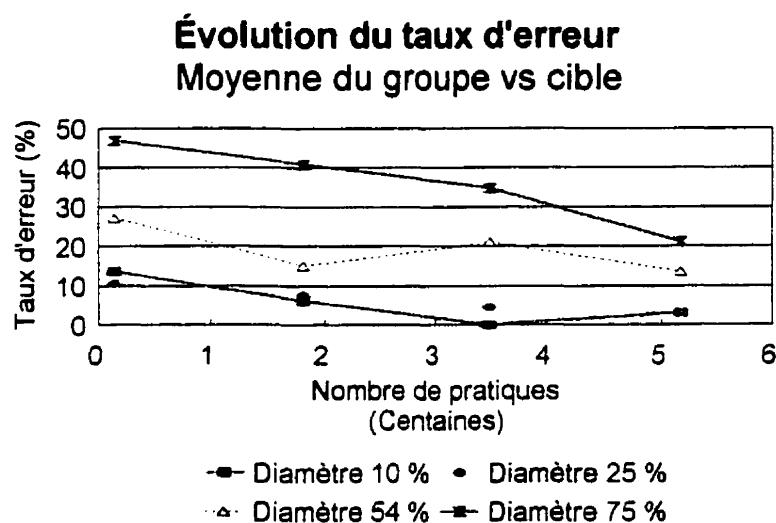
$$T_1 = 46,2 \text{ s} \quad \alpha = 0,207 \quad R^2 = 0,877$$

On remarque que le temps de mouvement initial ( $T_1$ ) et le coefficient d'apprentissage ( $\alpha$ ) sont sensiblement les même que ceux obtenus dans les même conditions (tâche 1, distance de cible de 40 °) par le groupe de sujets de la série d'essais précédente, à savoir  $T_1 = 41,2$  s et  $\alpha = 0,223$ .

Ces résultats encourageants indiquent que le coefficient d'apprentissage varie peu d'un groupe d'opérateurs à l'autre avec une valeur moyenne d'environ 0,21. Cela valide donc l'estimation faite à la section 5.1.2.1 où nous avons supposé un coefficient d'apprentissage constant d'une valeur de 0,21.

## Taux d'erreur

Une analyse de la variance indique une différence significative du taux d'erreur selon le rapport de taille cible/pince utilisé ( $F(3,40) = 10,04$ ;  $p<0,01$ ). La figure 5.11 ci-dessous illustre les résultats obtenus:



**Figure 5.11** Taux d'erreur vs pratique et diamètre de cible

Comme on peut le constater, il n'y a pas de différence significative entre les résultats obtenus pour les deux plus petits diamètres ( $F(1,20) = 1,02$ ;  $p>0,05$ ). Ce résultat signifie que le taux d'erreur ne varie plus selon le rapport des tailles cible/pince en deçà d'une valeur de 25% où il n'évolue alors qu'en fonction de la pratique. Nous modéliserons donc la relation entre le taux d'erreur et le rapport des tailles cible/pince pour les valeurs supérieures à 25%.

Les données obtenues pour les deux petits diamètres sont donc regroupées sous forme d'une moyenne, pour diminuer les variations inhérentes au faible taux d'erreur.

Tentons maintenant de modéliser ces courbes à l'aide des trois modèles utilisés précédemment, soit les modèles linéaire, de la pratique et exponentiel. Pour pouvoir modéliser la variation du taux d'erreur en fonction du rapport de taille cible/pince à l'aide

d'un seul paramètre, nous devons supposer que les coefficients  $e$ ,  $\alpha$  et  $m$  sont constants pour chacune des courbes. Ainsi, peu importe le modèle choisi, il ne restera qu'à paramétriser le coefficient restant ( $d$ ,  $TE_1$  ou  $b$ ) selon le rapport de taille cible/pince.

Un ajustement des trois modèles à l'aide de la méthode des moindres carrés donne les résultats suivants:

**Tableau 5.10** Ajustement des différents modèles pour le taux d'erreur

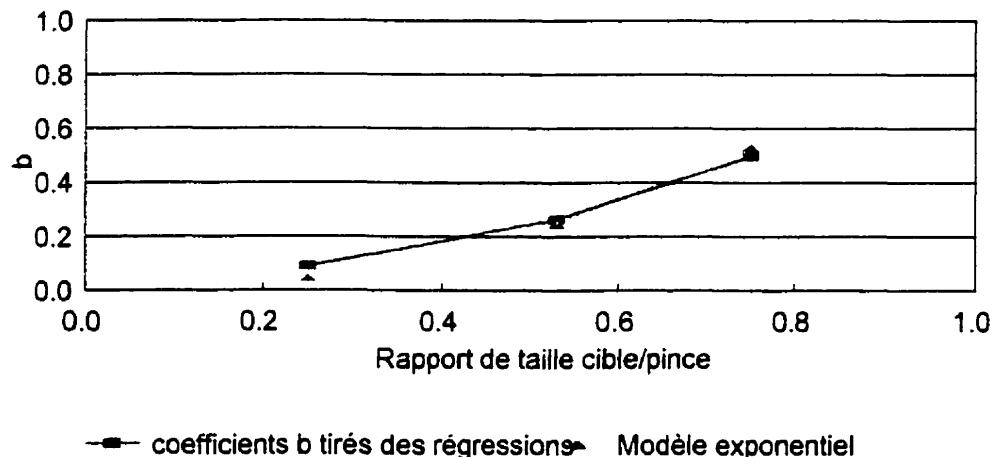
Modèle	Coefficient constant	Coefficient de détermination ( $R^2$ )
linéaire ( $y = d + e \cdot n$ )	$e = -0,0298$	0,692
loi de la pratique ( $y = TE_1 \cdot n^{-\alpha}$ )	$\alpha = 0,141$	0,638
exponentiel ( $y = b \cdot c^n$ )	$c = 0,998671$	0,791

On constate que le modèle exponentiel obtient le coefficient de détermination le plus élevé et donc modélise le mieux le taux d'erreur, ou du moins en explique le mieux les variations. Il reste maintenant à paramétriser  $b$  (l'autre coefficient du modèle exponentiel) selon le rapport de taille cible/pince. Le tableau 5.11 ci-après résume les données à notre disposition, tandis que la figure 5.12 trace l'évolution du paramètre  $b$  selon le rapport de taille cible/pince.

**Tableau 5.11** Valeurs du paramètre  $b$  en fonction des rapports de taille cible/pince

Rapport de taille cible/pince	$b$
0,250	0,0904
0,538	0,26373
0,750	0,49705

À première vue on peut penser qu'une régression linéaire modéliseraient très bien la relation entre le paramètre  $b$  et le rapport de taille cible/pince. Cependant, on sait qu'un rapport de taille cible/pince unitaire signifie que le diamètre de l'arbre à saisir est égal à celui de la pince et qu'en conséquence, le taux d'erreur sera de 100%, ce qui signifie un coefficient  $b$  d'environ 1. Il apparaît alors évident qu'un modèle exponentiel du type  $b = (\text{rapport de taille cible/pince})^z$  approximera bien cette relation. Ainsi, une régression à l'aide de la méthode des moindres carrés nous donne un exposant  $z = 2,20$  ( $R^2 = 0,959$ ). Le modèle est superposé aux données du tableau 5.11 à la figure 5.12.



**Figure 5.12** Modélisation du paramètre  $b$

Si on rassemble tous les morceaux, on trouve donc que le taux d'erreur peut être modélisé de la manière suivante:

$$TE_n = b c^n \quad \text{où}$$

$TE_n$  = Taux d'erreur à la  $n$ ième pratique

$$b = |0,09 \quad \text{si } (\text{taille de la cible/taille de la pince}) \leq 0,25 \\ |(\text{taille de la cible/ taille de la pince})^{2,20} \text{ autrement}$$

$$c = 0,998627$$

n = nombre de pratiques

En fait, l'utilisation de ce modèle pour expliquer les données recueillies durant cette phase d'essais nous donne un coefficient de détermination  $R^2$  de 0,661 sur les données actuelles et un  $R^2$  de 0,602 sur les données de la série d'essais précédente (section 5.1.2.2).

Ce faible coefficient  $R^2$  et l'extrapolation avec un rapport de taille cible/pince unitaire montrent bien qu'un modèle simple comme celui obtenu ici n'est pas suffisant pour représenter la réalité. Pour obtenir une plus grande précision, nous conseillons donc d'interpoler à partir des données expérimentales (tableau 5.11), en ajoutant également le point  $b = 1.0$  pour un rapport de taille cible/pince unitaire.

### **Écart longitudinal**

Une analyse de la variance ne révèle aucune différence significative de l'écart longitudinal lorsqu'on fait varier le rapport de taille cible/pince ( $F(3,40) = 1,68; p>0,05$ ).

De même, il n'y a pas de différence significative selon le nombre de pratiques ( $F(3,40) = 2,24; p>0,05$ ). Ce dernier résultat plutôt surprenant s'explique par le faible nombre de pratiques (517), comparativement à 2452 pratiques lors des essais précédents, où l'on a remarqué une différence significative de l'écart longitudinal selon le nombre de pratiques. De plus, si on baisse le niveau de confiance nécessaire à 90% au lieu de 95%, l'analyse de la variance détecte effectivement une différence significative.

Comme l'évolution de l'écart longitudinal a déjà été modélisée précédemment (section 5.1.2.3), nous passons tout de suite à l'analyse des données expérimentale concernant le dernier critère de performance: l'écart d'orientation.

### **Écart d'orientation**

Une analyse de la variance ne détecte aucune différence significative de l'écart d'orientation lorsqu'on fait varier le rapport de taille cible/pince ( $F(3,40) = 1,06$ ;  $p>0,05$ ).

De même, il n'y a pas de différence significative de l'écart d'orientation selon le nombre de pratiques ( $F(3,40) = 1,45$ ;  $p>0,05$ ). Comme pour l'écart longitudinal, ce résultat surprenant s'explique par le faible nombre de pratiques (517), comparativement à 2452 pratiques lors des essais précédents, où l'on avait remarqué une différence significative de l'écart d'orientation selon le nombre de pratiques. Nous conservons donc le modèle développé précédemment à la section 5.1.2.4.

#### **5.2.3 Discussion**

Cette nouvelle série d'essais a permis de constater que le rapport de taille cible/pince n'a pas d'effet significatif sur le temps de mouvement, ni sur l'écart longitudinal ou l'écart d'orientation. Il a cependant un effet significatif sur le taux d'erreur pour des valeurs de 25% et plus. Nous avons donc développé un modèle empirique qui modélise le taux d'erreur en tenant compte non seulement de la pratique, mais également de ce facteur.

### **5.3 Étude du critère de distance de la cible**

On a déjà vu (section 5.1.3) que la distance de la cible a un effet significatif sur le temps de mouvement, mais pas sur les trois autres critères de performance.

On a également remarqué (section 5.1.2.1) que le temps de mouvement initial augmente en moyenne de 7,4 s lorsque la distance entre la cible et chacune des articulations passe de 20° à 40°, quel que soit le type de tâche.

Ces constatations indiquent clairement qu'une partie du temps de mouvement est consacrée à la saisie de la cible en tant que tel tandis qu'une seconde partie sert au déplacement de la pince vers la cible et donc dépend d'un critère qui mesure la "distance" initiale de la cible avec chacune des articulations.

On peut donc d'ores et déjà dire que:

$$\text{temps de mouvement} = \text{temps de déplacement} + \text{temps de saisie}$$

À noter qu'ici le temps de déplacement réfère au temps de déplacement grossier de l'outil jusqu'à proximité de la tige, tandis que le temps de saisie correspond au temps nécessaire pour saisir la tige une fois l'outil arrivé à proximité de la tige, c'est-à-dire à une distance où les collisions entre la tête et la tige sont possibles. Il est intéressant de noter que ces descriptions du temps de déplacement et du temps de saisie correspondent bien aux tâches généralement décrites dans les analyses de tâche des téléopérateurs lourds comme c'est le cas ici [Cook, 1993].

Or, bien qu'à première vue le critère de "distance" de la cible soit la distance articulaire maximale, il est certain que les vitesses articulaires maximales ont également une influence sur le temps de déplacement. Ainsi, nous pensons que le temps de déplacement ne dépend pas seulement de la distance de la cible par rapport aux articulations, mais aussi, comme nous l'avons vu à la section 2.3.1, des limites physiques du téléopérateur, c'est-à-dire du temps de parcours minimum nécessaire à chacune des articulations pour atteindre la cible, qui peut être approximé par

$$\text{temps de déplacement} = f(\text{temps de parcours minimal}) \quad \text{où}$$

$$\text{temps de parcours minimal} = \max (\Delta\theta_i / V_{\max i}) \quad i = 1 \dots 4 \quad \text{où}$$

$\Delta\theta_i$  = distance qui sépare la position initiale de la cible de la  $i$ ème articulation

$V_{\max i}$  = vitesse articulaire maximale de l'articulation  $i$ .

Autrement dit, le temps de déplacement est tributaire du plus grand des temps de déplacement articulaire minimum, calculé en prenant le plus grand rapport entre les distances articulaires et leurs vitesses articulaires correspondantes.

Pour vérifier notre affirmation, nous devons nous appuyer sur des preuves tangibles. C'est pourquoi nous avons conçu une dernière série d'essais expérimentaux où nous avons comparé le temps de mouvement nécessaire pour saisir des cibles situées à des distances variables de chacune des articulations.

Comme dans notre cas, les vitesses articulaires du téléopérateur utilisé dans nos expériences sont différentes ( $V_{max_1} = V_{max_2} = V_{max_3} = 20^\circ/s$  et  $V_{max_4} = 90^\circ/s$ ), alors nous pouvons tester notre hypothèse en comparant le temps de mouvement nécessaire pour atteindre six cibles situées aux distances et temps de parcours articulaires indiqués au tableau 5.12.

**Tableau 5.12** Distances et temps de parcours articulaires des cibles utilisées

Cible	Distances articulaires	Temps de parcours articulaires
1	(20°; 20°; 20°; 20°)	(1 s; 1 s; 1 s; 0,22 s)
2	(40°; 20°; 20°; 20°)	(2 s; 1 s; 1 s; 0,22 s)
3	(20°; 40°; 20°; 20°)	(1 s; 2 s; 1 s; 0,22 s)
4	(20°; 20°; 40°; 20°)	(1 s; 1 s; 2 s; 0,22 s)
5	(20°; 20°; 20°; 40°)	(1 s; 1 s; 1 s; 0,44 s)
6	(40°; 40°; 40°; 40°)	(2 s; 2 s; 2 s; 0,44 s)

En effet, si le temps de déplacement dépend de la distance articulaire maximale, alors il devrait y avoir une différence significative du temps de mouvement entre la cible 1 ( $\max[\Delta\theta_i] = 20^\circ$ ) et les autres ( $\max[\Delta\theta_i] = 40^\circ$ ). Par contre, si le temps de déplacement dépend du temps de parcours articulaire maximal, alors il devrait y avoir une différence

significative du temps de mouvement entre les cibles 1 et 5 ( $\max[\Delta\theta_i/V_{\max,i}] = 1$  s) et les autres ( $\max[\Delta\theta_i/V_{\max,i}] = 2$  s).

### **5.3.1 Méthodologie**

La méthodologie utilisée est similaire à celle utilisée pour les essais précédents (section 5.2).

#### **5.3.1.1 Tâche**

Seule la tâche de saisie d'une tige verticale (tâche 1) a été utilisée.

#### **5.3.1.2 Sujets**

Les onze sujets de l'expérience précédente (section 5.2) ont participé à cette série d'essais.

#### **5.3.1.3 Variable indépendante**

La variable indépendante est la distance de la cible avec chacune des articulations, tel qu'indiqué précédemment au tableau 5.12. Il ya donc 6 distances de cible, exprimée par un vecteur de quatre angles qui indique la distance séparant la cible de la position initiale de chacune des quatre articulations.

#### **5.3.1.4 Variable dépendante**

La seule variable dépendante utilisée est le temps de mouvement car nous avons déjà prouvé qu'il s'agit du seul critère de performance affecté par la distance de la cible (voir section 5.2).

### 5.3.1.5 Variables de contrôle

Comme il s'agit des même sujets que pour l'expérience précédente (section 5.2), nous savons qu'ils ont tous une expérience égale en terme de nombre de pratiques, soit 685 pratiques de la tâche de saisie.

### 5.3.1.6 Procédure expérimentale

Les sujets effectuaient six pratiques de réchauffement suivies de six répliques pour chacune des six distances de cible étudiées, pour un total de 42 essais. La durée des essais était d'environ dix minutes par sujet pour les 42 essais et l'expérience a eu lieu le 24 juin 1998.

## 5.3.2 Analyse des résultats

L'analyse des résultats procède de la même manière que pour les deux séries d'essais précédentes (voir section 5.1.2), sauf que dans ce cas-ci, nous n'avons qu'une seule variable indépendante (la distance articulaire maximale de la cible) et une seule variable dépendante (le temps de mouvement). Seul le temps de mouvement est analysé car nous avons déjà prouvé qu'il s'agit de la seule variable dépendante affectée par la distance de la cible. Les données expérimentales recueillies sont tabulées à l'annexe 8.

### Temps de mouvement

L'analyse de la variance révèle qu'il existe une différence significative entre les temps de mouvement obtenus avec les différentes distances de cible énumérées au tableau 5.12 ( $F(5,60) = 2,60$ ;  $p<0,05$ ).

L'analyse de la moyenne (ANOM) multifactorielle (voir annexe 11) révèle qu'il existe une différence significative du temps de mouvement ( $p<0,05$ ) entre les cibles 1 et 5 et les autres cibles (2,3,4,6). Cependant, l'analyse de la variance (ANOVA) ne fait ressortir aucune

différence significative du temps de mouvement entre les cibles 1 et 5 ( $F(1,20) = 1,03$  ( $p>0,05$ )) ni entre les autres cibles ( $F(3,40) = 2,12$  ( $p>0,05$ )).

Sachant cela, nous pouvons donc affirmer que le temps de mouvement peut être divisé en deux composantes, soit le temps de déplacement et le temps de saisie, et que le temps de déplacement dépend du temps de parcours minimal, tel que défini précédemment.

Notre modèle décrivant le temps de mouvement devient donc:

$$\text{Temps de mouvement} = T_1 n^{-\alpha} = (TD_1 + TS_1) n^{-\alpha} \quad \text{où}$$

$T_1$  = temps de mouvement initial (s)

$n$  = nombre de pratiques

$\alpha$  = coefficient d'apprentissage qui doit être déterminé expérimentalement (environ 0,21)

$TD_1$  = temps de déplacement initial =  $k_1 \max(\Delta\theta_i / V_{max_i})$

$TS_1$  = temps de saisie initial, à déterminer expérimentalement, qui varie selon la tâche à exécuter (environ 23,9 s pour la tâche 1 et 13,8 s pour la tâche 2)

$k_1$  = rapport empirique entre les temps de déplacement initial et minimal  $\approx 7,4$

$\Delta\theta_i$  = distance articulaire séparant la cible de la  $i$ ème articulation ( $i = 1 \dots 4$ )

$V_{max_i}$  = vitesse articulaire maximale de la  $i$ ème articulation ( $i = 1 \dots 4$ )

### 5.3.3 Discussion

Nous savons maintenant que le temps de mouvement est composé d'un temps de déplacement et d'un temps de saisie, qui répondent tous deux à la loi de la pratique.

Le temps de déplacement réfère au temps de déplacement grossier de l'outil jusqu'à proximité de la tige. Ce temps est borné inférieurement par le plus grand des quotients entre les distances articulaires et leurs vitesses articulaires maximales respectives. Cette limite

inférieure correspond à la situation où le bras manipulateur parcourt le chemin le plus rapidement possible entre sa position initiale et la position la plus rapprochée de la tige qui soit sans possibilités de collision.

Cette borne inférieure du temps de mouvement nous permet donc de calculer une valeur limite pour l'extrapolation de ce modèle. Dans notre cas, cette valeur correspond en fait à une valeur  $n$  d'environ 300 000 pratiques, pour le modèle de performance avec la tâche de saisie verticale avec distance de cible de 40 degrés. Ce nombre est encore plus grand pour les trois autres combinaisons de tâches et de distance de cible.

En supposant l'exécution d'une tâche de saisie à toutes les 30 s d'opération, cela confère à notre modèle du temps de mouvement une validité d'au moins 1 an dans le cas d'un opérateur opérant à temps plein. Cette étendue de validité est amplement suffisante pour permettre de prédire la performance (en terme de temps de mouvement). Au delà de cette limite on peut considérer que la performance se stabilise et n'augmente plus, ce qui semble être un portrait de la réalité, où on considère que la performance maximale d'un opérateur d'abatteuse-façonneuse plafonne après une à deux années d'opération [Richardson, 1994b; Juntunen, 1995; Freedman, 1998].

Si le temps de déplacement répond à la loi de la pratique, c'est qu'au départ l'opérateur ne suit pas une trajectoire parfaitement rectiligne (dans l'espace articulaire) entre la position initiale et la position de saisie. Cette situation est tout à fait normale, puisqu'il faut beaucoup de pratique avant de parvenir à coordonner parfaitement le mouvement des quatre articulations<sup>29</sup>.

---

<sup>29</sup> À noter que le temps de déplacement minimum peut -être atteint même si le bras manipulateur ne suit pas une trajectoire en ligne droite dans l'espace articulaire. Cependant, on considère un mouvement comme parfaitement coordonné lorsque celui-ci suit le chemin le plus court entre deux configurations, c'est-à-dire une trajectoire en ligne droite dans l'espace articulaire [Zhai, 1998].

Par ailleurs, le temps de saisie correspond au temps nécessaire pour saisir la tige une fois l'outil arrivé à proximité de la tige, c'est-à-dire à une distance où les collisions entre la tête et la tige sont possibles. Il représente donc la somme du temps pris par l'opérateur pour contourner la cible à l'aide de la pince et le temps d'activer la fermeture de cette dernière.

En effet, rappelons que la différence fondamentale entre une tâche de saisie et une tâche de pointage, c'est la possibilité de collision entre l'outil et la cible, qui possèdent tous deux des dimensions physiques mesurables. L'existence de cette possibilité implique parfois un contournement de la cible par l'outil pour pouvoir la saisir selon la position et l'orientation désirée.

Quant au temps d'activation de la fermeture de la pince, il est plutôt petit comparativement au temps de contournement de la cible et est de l'ordre d'une seconde tout au plus. Il consiste essentiellement au temps de réaction simple nécessaire pour appuyer sur la touche de fermeture des pinces une fois que l'opérateur considère qu'il a bien positionné le bras manipulateur en position de saisie.

Rappelons que le temps de réaction simple varie généralement entre 100 ms et 300 ms [Wargo, 1967] et qu'il peut être défini de la façon suivante [Beauchamp, 1989]:

«Temps écoulé entre l'émission d'un stimulus et l'initiation de la réponse du sujet à qui on a demandé de répondre aussi rapidement que possible.»

## CHAPITRE VI - SYNTHÈSE ET RECOMMANDATIONS

L'analyse de la tâche des opérateurs de machines forestières nous a permis de réaliser que la manipulation de l'outil des téléopérateurs à 4 ddl occupe plus de la moitié du temps de travail des opérateurs. De plus celle-ci est généralement réalisée en même temps que la planification des tâches et l'opération de l'outil.

L'interface de commande actuelle des téléopérateurs forestiers à 4 ddl utilise deux manettes à 2 ddl et un mode de commande articulaire pour manipuler l'outil. Ce mode de commande requiert un certain temps d'apprentissage pour permettre à l'opérateur de se construire un modèle mental de la cinématique inverse du bras manipulateur. Dans un premier temps, notre étude visait donc à utiliser les possibilités offertes par l'informatique embarquée et les dispositifs de commande à plus de 2 ddl pour créer une interface de commande qui rende la manipulation de l'outil plus compatible avec l'opérateur, dans le but de réduire son temps d'apprentissage.

En effet, avec une interface de commande transparente, l'opérateur pourrait centrer son attention sur la planification des tâches et l'opération de l'outil. Il est difficile d'évaluer avec précision le temps requis par un opérateur pour acquérir un modèle mental de la cinématique inverse du bras manipulateur. Cela est dû au fait que ce modèle est acquis en même temps que les connaissances requises pour planifier les tâches et opérer l'outil. Une chose est cependant certaine, en réduisant la charge de travail mental reliée à la manipulation, on accélère d'autant plus l'acquisition des habiletés nécessaires pour la planification des tâches et l'opération de l'outil.

Finalement, notre étude visait également à modéliser la performance des opérateurs lors de la réalisation de tâches de saisie de tige, en fonction des principaux facteurs qui affectent celle-ci.

Les informations recueillies devraient aider les concepteurs d'interfaces de commande à concevoir des interfaces de commande qui améliorent la productivité et la satisfaction des opérateurs de téléopérateurs forestiers à 4 ddl.

## 6.1 Résultats expérimentaux

Après plus de 35 000 essais réalisés par 40 sujets novices différents, les résultats auxquels nous sommes parvenus sont multiples. Ainsi nous avons d'une part testé les hypothèses soulevées au départ (voir section 2.4) et d'autre part, nous avons mis au point un modèle de performance pour les tâches de saisie réalisées à l'aide d'un téléopérateur forestier à 4 ddl.

### 6.1.1 Évaluation des hypothèses

En clair, le test des hypothèses de départ nous donne les résultats suivants.

#### 1) Commande coordonnée en vitesse

L'utilisation de la commande coordonnée en vitesse (peu importe le mode de commande) améliore la performance des opérateurs novices comparativement à l'interface de commande conventionnelle (c'est-à-dire avec deux manettes de commande à 2 ddl, un mode de commande articulaire en vitesse et une fonction de gain linéaire). Ce gain de performance affecte particulièrement le temps de mouvement (réduction moyenne de 20 % pour les deux tâches) et le nombre d'erreurs produites (réduction moyenne de 27 % pour les deux tâches).

Les essais sur le terrain (section 4.3) confirment également ces résultats, avec une diminution significative de 18% du temps de mouvement lors de l'utilisation de la commande coordonnée cylindrique (traitement 2 du tableau 4.1) comparativement à l'interface conventionnelle.

Par ailleurs, les données concernant la satisfaction montrent que les sujets ont préféré la commande coordonnée à la commande articulaire, autant sur le simulateur que sur le téléopérateur réel.

## 2) Mode de commande coordonnée

Sauf pour l'écart d'orientation lors de la saisie de grumes, où le mode cartésien est nettement supérieur (écart d'orientation moyen de 1,6° comparativement à 3,9° pour les modes cylindrique et tangentiel), il n'y a pas de différence significative entre les trois modes de commande coordonnée en vitesse pour ce qui est de la performance des opérateurs novices. Il n'y a pas non plus de différence entre ces modes de commande en ce qui concerne la satisfaction éprouvée par les sujets suite à leur utilisation.

Par contre, nous recommandons le mode de commande coordonnée cylindrique avec, si possible une option pour le mode cartésien, car le mode tangentiel s'adapte mal aux différentes géométries de téléopérateur à 4 ddl pour les raisons évoquées à la section 4.2.4.

Si le mode cartésien améliore la précision d'orientation lors de la saisie des grumes, c'est à cause d'une orientation absolue de l'outil de saisie dans le référentiel du milieu de travail (en supposant que la base du téléopérateur est immobile durant les opérations). Il faut cependant noter qu'une telle précision n'est pas nécessaire pour réaliser les tâches actuelles. On pourrait également adapter cette orientation absolue au mode cylindrique. Cette possibilité devrait cependant être étudiée, question de vérifier que les bénéfices de l'orientation absolue s'appliquent également au mode cylindrique.

## 3) Intégration du dispositif de commande

Lors de la commande coordonnée en vitesse, l'utilisation d'un dispositif de commande à 4 ddl (palonnier) plutôt qu'un dispositif ayant deux manettes à 2 ddl améliore la performance

et la satisfaction<sup>30</sup> des opérateurs novices. Les gains de performance touchent le temps d'exécution (réduction moyenne de 48 % pour les deux tâches) et le nombre d'erreurs (réduction moyenne de 45 % pour les deux tâches).

À noter que cette hypothèse ne fut vérifiée que sur simulateur, car seuls des sujets juniors, i.e. ayant une expérience de plus d'un mois avec l'interface de commande conventionnelle ont participé à l'essai de cette interface sur le téléopérateur réel. Leur biais en faveur de l'interface de commande conventionnelle n'a pas permis de démontrer de façon significative la supériorité du palonnier comparativement aux manettes comme ce fut le cas pour les opérateurs novices sur le simulateur.

Cependant, en consultant les résultats obtenus (voir annexe 10), on constate que les sujets juniors ont réduit en moyenne leur temps de mouvement de 11,5 % avec le palonnier en mode cylindrique alors que la réduction n'était que de 7,2 % avec les manettes en mode cylindrique, comparativement à l'interface de commande conventionnelle. Même, si ces différences ne sont pas significatives au point de vue statistique, on peut remarquer une tendance semblable aux résultats sur simulateur.

#### 4) Fonction de gain

L'utilisation d'une fonction de gain exponentielle (cubique) n'améliore pas de façon significative la performance ou la satisfaction des opérateurs novices.

De plus, on note que la fonction de gain linéaire obtient un temps de mouvement et un taux d'erreur légèrement inférieurs à ceux obtenus par la fonction de gain exponentielle (cubique), même si cette diminution est trop petite pour être significative. Nous

---

<sup>30</sup> À noter que le résultat concernant la satisfaction diffère de celui obtenu dans le cadre d'une autre expérience sur un téléopérateur réel tel que mentionné précédemment à la section 4.3. Y référer pour plus de détails.

recommandons donc l'utilisation d'une fonction de gain linéaire pour les téléopérateurs forestiers.

Nous pensons cependant que les vitesses articulaires relativement peu élevées des trois premières articulations ( $20^{\circ}/s$ ) n'ont pas permis de démontrer l'efficacité d'une fonction de gain exponentielle pour améliorer la performance des opérateurs. Or, comme les vitesses articulaires des téléopérateurs forestiers risquent peu d'augmenter de façon significative au cours des prochaines années, les recherches sur les fonctions de gain doivent être reléguées à d'autres types de manipulateurs plus rapides.

### **5) Rapport de taille cible/pince**

L'analyse des données des essais a démontré que seul le taux d'erreur est affecté par le rapport de taille cible/pince. Celui-ci est d'ailleurs inversement proportionnel au rapport de taille cible/pince, c'est-à-dire au rapport entre le diamètre de la tige à saisir et le diamètre du plus grand cercle pouvant être inscrit dans l'outil de saisie (la pince).

#### **6.1.2 Au sujet de l'apprentissage**

La performance de l'opérateur novice s'améliore avec la pratique, peu importe le critère utilisé (temps d'exécution, taux d'erreur, écart longitudinal et écart d'orientation).

C'est d'ailleurs la variable qui influence le plus la performance. Ainsi, la performance s'améliore d'au moins 300% pour les quatre critères de performance après 2500 pratiques de la tâche de saisie, ce qui représente environ 25 heures de pratique.

Il faut noter cependant que cette pratique était concentrée uniquement sur la tâche de saisie alors que pour la formation actuelle des opérateurs de machines forestières, les opérateurs doivent tout apprendre en même temps: planification des tâches, conduite de la base mobile du téléopérateur, manipulation et opération de l'outil.

Cette surcharge informationnelle peut résulter en un temps d'apprentissage plus élevé que lorsque l'apprentissage est structuré de façon hiérarchique correspondant aux notions pédagogiques de la formation en sous-tâches (traduction de "part-task training") et de la formation adaptative (traduction de "adaptive training") [Wickens, 1992].

### 6.1.3 Modélisation de la performance

Les expériences du chapitre 5 ont permis la mise au point d'un modèle de performance pour chacun des quatre critères de performance jugés pertinents pour évaluer la performance lors de l'exécution de tâches de saisie à l'aide d'un téléopérateur forestier à 4 ddl.

Ces modèles sont<sup>31</sup>:

$$1) \text{ Temps de mouvement} = T_1 n^\alpha = (TD_1 + TS_1) n^\alpha \quad \text{où}$$

$$TD_1 = k_1 \max(\Delta\theta_i / V_{\max_i})$$

$$2) \text{ Taux d'erreur} = b c^n \quad \text{où} \quad b = 0,09 \text{ si le rapport de taille cible/pince} \leq 0,25 \quad \text{et} \\ b = (\text{rapport de taille cible/pince})^{2,20} \text{ autrement}^{32}$$

$$3) \text{ Écart longitudinal} = b c^n$$

$$4) \text{ Écart d'orientation} = EO_1 n^\alpha$$

Ces modèles empiriques tiennent compte de l'effet des facteurs les plus importants, soit le

<sup>31</sup> Pour alléger le texte, nous ne répéterons pas ici la signification de chacun des termes de ces équations. Pour une définition de ceux-ci, se référer à la liste des symboles.

<sup>32</sup> On peut aussi obtenir la valeur b par interpolation à l'aide des valeurs du tableau 5.11.

nombre de pratiques de l'opérateur, le rapport de taille cible/pince, la distance de la cible et les vitesses articulaires maximales du téléopérateur. Leur mise au point a permis d'améliorer notre compréhension de la tâche de saisie.

Ainsi, nous savons maintenant que le temps de mouvement peut globalement être séparé en deux composantes principales, soit le temps de saisie et le temps de déplacement. Nous avons également vérifié l'adéquation de la loi de la pratique pour bien modéliser l'évolution de ce critère selon l'expérience de l'opérateur, mesurée à partir du nombre de pratiques.

Cependant, pour ce qui est du taux d'erreur, un modèle exponentiel semble plus approprié que la loi de la pratique pour en décrire l'évolution selon le nombre de pratiques. De plus, nous avons découvert que le rapport de taille entre la cible et la pince affecte de façon significative ce critère de performance.

En ce qui concerne l'écart longitudinal, un modèle exponentiel est également plus approprié que la loi de la pratique pour en décrire l'évolution selon le nombre de pratiques.

Finalement, l'écart d'orientation est mieux modélisé par la loi de la pratique, mais l'évolution de ce critère de performance est plus rapide que pour le temps de mouvement, ce qui se reflète par un coefficient d'apprentissage plus élevé. Par définition, ce critère ne s'est pas montré d'une grande utilité pour évaluer la performance des opérateurs pour la deuxième tâche (saisie de grumes) puisqu'un écart d'orientation trop grand est comptabilisé comme une mauvaise saisie et affecte donc le taux d'erreur.

Les modèles obtenus décrivent la performance lors de l'utilisation de l'interface de commande conventionnelle (deux manettes de commande à 2 ddl, avec mode de commande articulaire et fonction de gain linéaire). Nous croyons cependant que la performance obtenue avec une interface de commande informatisée du genre de celles étudiées au chapitre 4 serait bien décrite par de tels modèles (avec des valeurs de paramètres différentes, bien sûr).

Il serait intéressant de comparer les courbes d'apprentissage obtenues avec l'interface conventionnelle et celles obtenues avec une interface de commande utilisant cette fois la commande coordonnée et une manette de commande à 4 ddl. Il serait alors possible de quantifier plus précisément les gains possibles avec cette dernière interface tout au long de la période d'apprentissage et de vérifier si cette interface permet à long terme d'atteindre des performances supérieures à l'interface conventionnelle ou si les deux courbes se rejoignent éventuellement en atteignant un plafond de performance.

Ce que l'on sait pour l'instant, c'est qu'avec l'interface conventionnelle, il faut environ 40 pratiques pour égaler la performance selon le temps de mouvement, tandis qu'il en faut 365 pour le taux d'erreur, 730 pour l'écart longitudinal et 537 pour l'écart d'orientation. Ces données permettent d'affirmer qu'il faut en moyenne 730 pratiques (environ cinq heures) à un opérateur novice utilisant l'interface conventionnelle pour atteindre ou dépasser, selon tous les critères le niveau de performance moyen obtenu par un opérateur novice après 30 minutes de pratique sur une interface qui utilise la commande coordonnée et un palonnier à 4 ddl.

## 6.2 Discussion

Les observations effectuées dans le cadre de cette thèse démontrent que la commande coordonnée combinée à l'utilisation d'un palonnier à 4 ddl améliore de façon significative la performance des opérateurs novices qui effectuent des tâches de saisie sur un téléopérateur forestier à 4ddl.

Or, les résultats suggèrent également que cette supériorité de performance ne persiste que durant les premiers jours d'utilisation comparativement à l'interface de commande actuelle. Ainsi, on note un accroissement de performance atteignant plus de 300 % après seulement 25 heures de pratique sur l'interface de commande conventionnelle.

Avec un apprentissage aussi rapide, on peut se questionner sur la performance à long terme de cette interface de commande. Ainsi, est-ce que la commande coordonnée combinée à l'utilisation d'un palonnier à 4 ddl procure encore un avantage au niveau de la performance suite à la période d'apprentissage?

Pour trancher la question, les prochaines recherches devraient porter sur la comparaison des courbes d'apprentissage obtenues respectivement avec l'interface conventionnelle et une interface de commande en mode coordonné utilisant un palonnier à 4 ddl. Cette comparaison devrait cependant être réalisée sur un téléopérateur réel pour tenir compte de tous les facteurs qui ne sont pas ou difficilement reproductibles sur simulateur, tels que les vibrations. Les résultats obtenus permettraient de déterminer, s'il y a lieu, le temps moyen qu'il faut à un opérateur utilisant l'interface conventionnelle pour atteindre la performance d'une interface en mode coordonné avec palonnier.

En attendant, une série d'études sur le terrain a permis de démontrer que la formation sur simulateur graphique 3D (celui présenté dans cette thèse) permet d'augmenter de façon significative la performance d'un opérateur novice utilisant l'interface de commande conventionnelle [Lapointe 1999]. Cette formation permet à l'opérateur de développer un modèle mental de la cinématique inverse du bras manipulateur. Elle offre également l'avantage de ne présenter aucun ralentissement de la production ni aucun risque de bris pour la machine.

Dans cette optique, et en attendant une automatisation plus poussée de l'interface de commande, la formation sur simulateur semble donc être une alternative intéressante à la commande coordonnée pour réduire le temps d'apprentissage des opérateurs sur la vraie machine et ainsi augmenter leur productivité.

Une autre avenue de recherche intéressante concernant la téléopération à 4 ddl serait d'étudier la performance des opérateurs pour des tâches de suivi de trajectoire. En effet, ce

forestière sur simulateur en intégrant des éléments de formation autres que la saisie, notamment des éléments de planification lors du déplacement du véhicule.

Une autre avenue de recherche intéressante concernant la téléopération à 4 ddl serait d'étudier la performance des opérateurs pour des tâches de suivi de trajectoire. En effet, ce genre de tâches bien que peu présent dans le domaine de la foresterie est très utilisé en construction où les opérateurs d'excavatrices et de rétrocaveuses doivent parfois faire suivre des trajectoires précises à leur outil, par exemple pour creuser un fossé ou pour étendre du remblais à l'aide de leur godet.

Il serait également intéressant d'étudier des manipulateurs plus rapides (vitesses articulaires supérieures à 20 degrés/s) et une plus grande étendue de distance de cible pour raffiner nos modèles et poursuivre notre recherche sur les fonctions de gain.

Finalement, nous pourrions étudier la performance d'une interface de commande utilisant le mode cylindrique, mais cette fois-ci avec une orientation absolue, comme c'est le cas avec le mode cartésien.

## CONCLUSION

Cette recherche a permis d'étudier l'impact de l'interface humain-machine et d'identifier les différents facteurs qui affectent la performance humaine lors de la commande en vitesse d'un bras manipulateur à 4 ddl.

Ainsi, l'analyse de tâche a révélé que plus de la moitié du temps d'opération de ces machines était consacré à des tâches de manipulation telles que la saisie de tiges de bois. Nous avons également constaté que l'utilisation d'une interface de commande en vitesse en mode articulaire demandait à l'opérateur la construction d'un modèle mental de la cinématique inverse du bras manipulateur, ce qui nécessite un certain temps d'apprentissage.

Nous avons ainsi testé huit interfaces de commande différentes faisant appel, entre autres, à l'informatique embarquée et à un dispositif de commande à 4 ddl intégré, dans le but d'améliorer la performance des opérateurs novices.

Une retombée intéressante de cette recherche est la mise au point d'une méthode d'évaluation ergonomique rigoureuse qui utilise plusieurs critères de performance pour comparer de façon objective diverses interfaces de commande lors de la réalisation de tâches de saisie à 4 ddl.

Les essais effectués sur un simulateur graphique 3D consistaient à réaliser des tâches de saisie de tige à l'aide de la pince située au bout du bras manipulateur. Ces essais ont permis de trouver que la performance des opérateurs de machines forestières à 4 ddl telles que les abatteuses-façonneuses, les porteurs et les chargeuses pouvait être caractérisée par quatre critères: le temps de mouvement, le taux d'erreur, l'écart longitudinal et l'écart d'orientation.

Grâce à ces essais, nous savons maintenant que l'utilisation de la commande coordonnée et

l'utilisation d'un palonnier à 4 ddl améliorent de façon significative la performance et la satisfaction des opérateurs novices et que leurs effets sont additifs. Nous savons également découvert que le mode de commande coordonnée cylindrique offrait plus d'avantages que les modes cartésiens et tangentiels pour la saisie de tiges.

Ces résultats viennent compléter ceux des travaux précédents, notamment ceux de Lawrence et Wallersteiner [Lawrence, 1990, 1993; Wallersteiner, 1988, 1993] des pionniers de la commande coordonnée appliquée aux équipements lourds. Ces travaux comparaient ainsi une interface de commande en mode coordonné tangentiel combinée à l'utilisation d'un palonnier. Ce choix a été réalisé sans avoir auparavant étudié l'apport séparé de la commande coordonnée et de l'intégration des 4 ddl sur un même dispositif de commande (le palonnier). Ses travaux n'ont pas non plus comparé les modes de commande cylindrique et cartésien. En ce sens, notre étude est un apport important pour les concepteurs d'interfaces de commande.

Nous avons également découvert que l'apprentissage est le facteur qui influe le plus sur la performance des opérateurs. Ainsi, la performance des opérateurs novices s'améliore en moyenne d'au moins 300 % pour chacun des critères de performance utilisés, suite à environ 25 heures de pratique.

Finalement, nous avons développé un modèle décrivant la performance lors d'une tâche de saisie pour chacun des quatre critères énumérés précédemment. Ces modèles tiennent compte de l'apprentissage, de la distance de la cible, du rapport de taille entre la cible et la pince et des vitesses articulaires limites du bras manipulateur.

Ces modèles sont en soi une contribution importante au domaine, puisqu'il n'existe pas auparavant de modèle de performance pour les tâches de saisie, comme c'est le cas par exemple pour les tâches de pointage avec la loi de Fitts. De plus, à notre connaissance, il n'existe pas de modèles de performance qui tiennent compte en même temps de tous ces

facteurs et utilisent quatre critères pour quantifier la performance.

Ces modèles permettent dorénavant de mieux comprendre et prédire la performance humaine en téléopération, pour les bras manipulateur munis de pinces.

Pour conclure, les résultats et les méthodes développées ici pourront éventuellement servir de base pour l'étude de la saisie avec d'autres types de téléopérateurs.

## RÉFÉRENCES

- ACCOT, J. (1997). Au-delà de la loi de Fitts: des modèles pour les tâches de navigation dans les interfaces. Compte-rendus de la conférence IBM 97, Poitiers, 89-96.
- ACCOT, J. et CHAI, S. (1997). Beyond Fitts' law: models for trajectory-based HCI tasks. Proceedings of CHI' 97, ACM Conference on Human Factors in Computing Systems, 295-302.
- AIKEN, E.W. (1986, July). A review of the effects of side-stick controllers on rotorcraft handling qualities. Journal of the American Helicopter Society, 27-33.
- ARNAUT, L.Y. et GREENSTEIN, J.S. (1990). Is display/control gain a useful metric for optimizing an interface ? Human Factors, Vol. 32, No. 6, 651-663.
- BARFIELD, W., HENDRIX, C., BJORNESETH, O., KACZMAREK, K.A. et LOTENS, W. (1995). Comparison of human sensory capabilities with technical specifications of virtual environment equipment. Presence: Teleoperators and Virtual Environments, Vol. 4, No. 4, 329-356.
- BASTIEN, J.M.C. (1991). Validation de critères ergonomiques pour l'évaluation d'interfaces utilisateurs. Rapport no 1427, Programme 3 - Intelligence artificielle, Systèmes cognitifs et Interaction homme-machine, INRIA, France.
- BATY, D.L. (1971). Human transinformation rates during one-to-four axis tracking. Proceedings of the 7th Annual Conference on Manual Control (NASA SP-281), Washington D.C., U.S. Government Printing Office, 293-306.
- BEAUCHAMP, Y. (1989). A study of human performance in the event of an unexpected robot motion. Ph.D. Thesis, College of Engineering of West Virginia University, USA.
- BECKER, J. et GREENSTEIN, J. (1986). A lead-lag compensation approach to display/control gain for touch tablets. Proceedings of the Human Factors Society 30th Annual Meeting, Santa Monica, CA: Human Factor Society, 332-336.

- BORDEGONI, M. (1994). Parallel use of hand gestures and force-input device for interacting with 3D and virtual reality environments. International Journal of Human-Computer Interaction, Vol. 6, No. 4, 391-413.
- BURDEA, G. et COIFFET, P. (1993). La réalité virtuelle, Hermès, Paris.
- CANNON, D.J. et LEIFER, L.J. (1990). Speed and accuracy for a telerobotic human/machine system: experiments with a target-threshold control theory model for Fitts' law. Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, 677-679.
- CARD, S.K., ENGLISH, W.K. et BURR, B.J. (1978). Evaluation of mouse, rate-controlled isometric joystick, step keys, and task keys for text selection on a CRT. Ergonomics, Vol. 21, No. 8, 601-613.
- CARD, S.K., MORAN, T.P. et NEWELL, A. (1983). The psychology of human-computer interactions, Lawrence Erlbaum Associates, Inc.
- CHERNIKOFF, R. et LEMAY, M. (1963). Effects of various display-control configurations on tracking with identical and different coordinate dynamics. Journal of Experimental Psychology, Vol. 66, 95-99.
- CLARK, M. (1994). Coordinated motion control of a feller-buncher. Technical Note TN-223, Forest Engineering Research Institute of Canada.
- CLARK, M. (1995). The application of coordinated motion control to forest machinery: a cost/benefit and market analysis. Industry Canada's Technological Innovations Workshop, Quebec city, 1-11.
- CLAVEAU, J. Y. (1995). Les procédés de récolte des bois utilisés au Québec dans les forêts du domaine public - Rapport annuel: exercice 1993-1994. Gouvernement du Québec, Ministère des Ressources naturelles, code de diffusion: RN95-3038.
- COOK, T.M. (1993). Teleoperation of heavy equipment: essentials visual information. Proceedings of the American Nuclear Society (ANS) Fifth Topical Meeting on Robotics and Remote Systems, 161-164.

- COIFFET, P. (1992). La robotique: principes et applications, 3e édition revue et complétée, Hermès.
- COOPER, G. et HARPER, R. (1969). The use of pilot ratings in the evaluation of aircraft handling qualities. Nasa Ames Technical Report (NASA TN-D-5153), Moffett Field, CA: Nasa Ames Research Center.
- COURTEAU, J. (1994 Winter). Robotics in Canadian forestry. IEEE Canadian Review, No. 18, 10-13.
- CROSSMAN, E.R. et COOKE, F.W. (1974). Manual control of slow response systems. The Human Operator in Process Control, E. Edwards, F. Lees (Eds). London: Taylor & Francis, 51-66.
- DEJONG, J.R. (1957). The effects of increasing skill on cycle time and its consequences for time standards. Ergonomics, Vol. 1, No. 1, 51-60.
- DESROCHERS, L. (1998). Essai comparatif de commandes informatisées et de commande conventionnelles sur le porteur FERIC. Rapport interne, Institut canadien de recherche en génie forestier (ERIC).
- DUNCAN, D.D. (1955). Multiple range and multiple F tests. Biometrics, Vol. 11, 1-42.
- DURLACH, N. et MAVOR, A.S. (Eds.) (1995). Virtual reality: scientific and technological challenges, Washington D.C.: National Academy Press.
- DRUSHKA, K. et KONTTINEN, H. (1997). Tracks in the forest - The evolution of logging machinery, Timberjack Group Oy, Helsinki, Finland.
- FELGER, W. (1992). How interactive visualisation can benefit from multidimensionnal input devices. Proceedings of SPIE on Visual data interpretation, Vol. 1668, J.R. Alexander, (Ed.), 15-24.
- FITTS, P.M. (1954). The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement. Journal of Experimental Psychology, Vol. 47, No. 6, 381-391.
- FRACKER, M.L. et WICKENS, C.D. (1989). Ressources, confusions, and compatibility in dual axis tracking: displays, controls, and dynamics. Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, Vol. 15, 80-96.

- FREEDMAN, P., PAPADOPOULOS, E., POUSSART, D., GOSSELIN, C. et COURTEAU, J. (1995). ATREF: Application des Technologies Robotiques aux Équipements Forestiers. Proceedings of the IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, Montréal, Québec, 1140-1143.
- FREEDMAN, P., MACKENZIE P. et LAPOINTE, J.F. (1997). A computer-based training environment for forestry telemanipulation. Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems IROS'97, Grenoble, France, 1826-1831.
- FREEDMAN, P. (1998). Forestry machine simulators: looking for added value in training. Proceedings of the Canadian Woodlands Forum Annual Meeting, Montréal, Québec, 19-22.
- FRENETTE, R. (1997). Projet ATREF, tâche COMM-5: Rapport intérimaire sur la mise en essai du système informatique de la machine FERIC, Centre de recherche informatique de Montréal (CRIM).
- FRENETTE, R. (1998). Projet ATREF - tâche COMM-5\*: Rapport final. Centre de recherche informatique de Montréal (CRIM).
- GÉLINAS, J. (1994). Sondage d'opinions réalisé auprès de gestionnaires et d'entrepreneurs forestiers. Document interne, Centre d'enseignement et de recherche en foresterie de Sainte-Foy (CERFO), référence.: 7432-ip-18/08/94.
- GIBBS, C.B. (1962). Controller design: interactions of controlling limbs, time-lags, and gains in positionnal and velocity systems. Ergonomics, Vol. 5, 385-402.
- GILKEY, R. H. et WEISENBERG, J.M. (1995). The sense of presence for the suddenly deafened adult: implications for virtual environments. Presence: Teleoperators and Virtual Environments, Vol. 4, No. 4, 357-363.
- GINGRAS, J.-F. et RYANS, M. (1992). Besoins futurs en équipements forestiers dans l'est du Canada. Fiche technique FT-193, Institut canadien de recherches en génie forestier (FERIC).
- GREENSPAN, M., LIPSETT, M., BALLANTYNE, J., RENTON, P., GAGNON, E. et BURTNYK, N. (1995). Laser range vision for tele-excavation. Proceedings of the Robotics and Knowledge Based Systems Workshop, The Canadian Space Agency, St-Hubert, Québec, 57-64.

GREENSPAN, M., BALLANTYNE, J. et LIPSETT, M. (1997). Sticky and slippery collision avoidance for tele-excavation. Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems IROS'97, Grenoble, France, 1666-1671.

HARSTELA, P. (1981). Small-scale simulators for the development of forest machines and working methods, training of operators and study of ergonomics. Seminar On Occupational Health and Safety and Applied Ergonomics on Highly Mechanized Logging Operations, Ottawa, Canada, 533-540.

HEIDERSDORF, E. (1987). Forest harvesting in Canada: past present and future. Proceedings of the Canadian Society for Mechanical Engineering, Canadian Engineering Centennial Convention, Montreal, 1-8.

HELD, R.M. et DURLACH, N.I. (1992). Telepresence. Presence: Teleoperators and Virtual Environments, Vol. 1, No. 1, 109-112.

HICKS, C.R. (1993). Fundamental concepts in the design of experiments, 4th edition, Saunders College Publishing.

HURTEAU, R., DESANTIS S., BEGIN, E. et GAGNER, M. (1994). Laparoscopic surgery assisted by a robotic cameraman: concept and experimental results. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, San Diego, USA, 2286-2289.

JACOB, R. J. K. et SIBERT, L.E. (1992). The perceptual structure of multidimensionnal input device selection. Proceedings of CHI'92, ACM Conference on Human Factors in Computing Systems, 211-218.

JENKINS, W. et CONNORS, M.B. (1949). Some design factors in making settings on a linear scale, Journal of Applied Psychology, 33, 395-409.

JUNTUNEN, M.L. (1993). Training of harvester operators in Finland. The use of multifunctionnal machinery and equipment in logging operations. Management and Training Seminar, ECE/FAO/ILO Joint Committee on Forest Technology, Olenino Logging Enterprise, VNPOlesprom, Tver Region (Russiaona Federation).

JUNTUNEN, M.L. (1995). Professional harvester operator: basic knowledge and skills from training - operating skills from working life ? Proceedings of the IUFRO XX World Congress, P3.03-00 Ergonomics, Tampere Finland, 1-10.

- KABBASH, P. et BUXTON, W. (1995). The "Prince" technique: Fitts' law and selection using area cursors. Proceedings of CHI' 95, ACM Conference on Human Factors in Computing Systems, 273-279.
- KIM, W.S., TENDICK, F., ELLIS, S.R. et STARK, L.W. (1987). A comparison of position and rate control for telemanipulation with consideration of manipulator system dynamics. IEEE Journal of Robotics and Automation, Vol. RA-3, No. 5, 426-436.
- LANDIS, K.H., DUNFORD, P.J., AIKEN, E.W. et HILBERT, K.B. (1985 April). Simulator investigations of side-stick controller/stability and control augmentation systems for helicopter visual flight. Journal of the American Helicopter Society, 3-13.
- LAPOINTE, J.F. (1994). Analyse ergonomique du travail de l'opérateur d'abatteuse-tronçonneuse. École Polytechnique de Montréal, département de génie industriel, document non publié, 31 pages.
- LAPOINTE, J.F. (1994b). Conception d'un poste de simulateur graphique d'abatteuse multifonctionnelle. École Polytechnique de Montréal, département de génie industriel, document non publié, 26 pages.
- LAPOINTE, J.F., ROBERT, J.M. et FREEDMAN, P. (1995). Analyse ergonomique du travail de l'opérateur d'abatteuse-tronçonneuse. Comptes-rendus du 27e congrès annuel de l'Association Canadienne d'Ergonomie, Québec, 111-116.
- LAPOINTE, J.F., FREEDMAN, P. et MACKENZIE, P. (1996). Using VE for training and augmenting human performance in forestry telemanipulation. Proceedings of SPIE Photonics East '96 - Telemanipulator and Telepresence Technologies III, Vol. 2910, Boston, Massachusetts, USA, 147-155.
- LAPOINTE, J.F. et ALARIE, R. (1997). Conduite de l'abatteuse multifonctionnelle: techniques d'opération, consignes de sécurité, entretien préventif, Centre de formation professionnelle Mont-Laurier, Commission scolaire Pierre-Neveu, Mont-Laurier, 44 pages.
- LAPOINTE, J.F. et ROBERT, J.M. (1999). La simulation graphique 3D comme outil efficace de formation en téléopération forestière. Comptes-rendus du 3e congrès international de génie industriel, Montréal, Québec, 10 pages.

LAWRENCE, P.D., SAUDER, B., WALLERSTEINER, U. et WILSON, J. (1990). Teleoperation of forest harvesting machines. Proceedings of the Symposium on Robotics in Forestry: Forest Operations in the Age of Technology, FERIC Special Report SR-75, Vaudreuil (Quebec), 36-39.

LAWRENCE, P.D., SASSANI, F., SAUDER, B., SEPEHRI, N., WALLERSTEINER, U. et WILSON, J. (1993). Computer-assisted control of excavator-based machines. SAE Technical Paper Series # 932486, International Off-Highway & Powerplant Congress & Exposition, Milwaukee, USA, 1-10.

MCAVINNEY, P. (1990 July). Teltale gestures: 3D applications need 3D Input. BYTE, 237-240.

MACKENZIE, S.I. (1992a). Fitts' law as a research and design tool in human-computer interaction. Human-Computer Interaction, Vol. 7, 91-139.

MACKENZIE, S.I. et BUXTON, W. (1992b). Extending Fitts' law to two-dimensionnal tasks. Proceedings of CHI'92, ACM Conference on Human Factors in Computing Systems, 219-225.

MACKENZIE, S.I. (1992c). Movement time prediction in human-computer interfaces. Proceedings of Graphics Interface'92, Canadian Information Processing Society, Toronto, 140-150.

MACKENZIE, S.I. et WARE, C. (1993). Lag as a determinant of human performance in interactive systems. Proceedings of CHI'93, ACM Conference on Human Factors in Computing Systems, New-York, 488-493.

MASSIMINO, M., SHERIDAN, T.B. et ROSEBOROUGH, J.B. (1989a). One handed tracking in six degrees of freedom. Proceedings of the IEEE Conference on Systems, Man and Cybernetics, Cambridge, 498-503.

MASSIMINO, M. et SHERIDAN, T.B. (1989b). Variable force and visual feedback effects on teleoperator man-machine performance. Proceedings of the Nasa Conference on Space Telerobotics, Vol. 1, Pasadena, CA., 89-98.

MCKENNA, J. (1996 January 15). First flight boosts Comanche program. Aviation Week & Space Technology, 44-45.

- MCKENNA, M. et ZELTER, D. (1992). Three dimensionnal visual display systems for virtual environments. Presence: Teleoperators and Virtual Environments, Vol. 1, No. 4, 421-458.
- MONTGOMERY, D.C. (1997). Design and analysis of experiments, 4th edition, John Wiley & Sons, New York.
- MORAY, N., LOOTSTEEN, P. et PAJAK, J. (1986). Acquisition of process control skills. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Vol. SMC-16, No. 4, 497-504.
- NEWELL, A. et ROSENBLUM, P.S. (1981). Mechanisms of skill acquisition and the law of practice. Cognitive Skills and their Acquisition. J.R. Anderson, ed., Lawrence Erlbaum Associates, Inc., 1-51.
- NEWELL, A. et CARD, S.K. (1985). The prospects for psychological science in human-computer interaction. Human-Computer Interaction, Vol. 1, No. 3, 209-242.
- NGUYEN, P.K. et HUGHES, P.C. (1994). Teleoperation: from the space shuttle to the space station. Teleoperation and Robotics in Space, S.B. Skaar, C.F. Ruoff, Progress in Astronautics and Aeronautics Series, Volume 161.
- OTT, L. (1984). An introduction to statistical methods and data analysis, 2nd edition, Duxbury Press, Boston.
- PADMOS, P. et MILDERS, M.V. (1992). Quality criteria for simulator images: a litterature review. Human Factors, Vol. 34, No. 6, 727-748.
- POULTON, E.C. (1974). Tracking skill and manual control, Academic Press, New York.
- PRESS, W.H., TEUKOLSKY, S.A., VETTERLING, W.T. et FLANNERY, B.P. (1992). Numerical recipes in C: the art of scientific computing, 2nd edition, Cambridge University Press.
- RANADIVE, V. (1979). Video resolution, frame rate and grayscale trade-offs under limited bandwidth for undersea teleoperation. SM Thesis, MIT, Cambridge, MA, USA.
- RICHARDSON, R. et HENDERSON, B. (1994). Impact de la récolte forestière sur l'environnement: revue de documentation. Communiqué technique no.: Général-40, Institut Canadien de recherches en génie forestier (FERIC), division de l'est.

- RICHARDSON, R. et MAKKONEN, I. (1994b). The performance of cut-to-length systems in eastern Canada. Technical Report TR-109, Forest Engineering Research Institute of Canada.
- RINALDUCCI, E.J. (1996). Characteristics of visual fidelity in the virtual environment. Presence: Teleoperators & Virtual Environments, Vol. 5, No. 3, 330-345.
- SANDERS, M.S. et MCCORMICK, E.J. (1992). Human factors in engineering and design, 7th edition, McGraw-Hill.
- SAPOSNIK, F. (1990). On woodsworthy electronics. Proceedings of the Symposium on Robotics in Forestry: Forest Operations in the Age of Technology, FERIC Special Report SR-75, Vaudreuil, Québec, 2-7.
- SCAPIN, D.L. et BASTIEN, J.M.C. (1997). Ergonomic criteria for evaluating the ergonomic quality of interactive systems. Behaviour and Information Technology, Vol. 16, No. 4/5, 220-231.
- SHAVELSON, R.J. (1996). Statistical reasoning for the behavioral sciences, 3rd edition, Stanford, USA.
- SHNEIDERMAN, B. (1992). Designing the user interface: strategies for effective human-computer interaction, 2nd edition, Addison-Wesley.
- SHERIDAN, T.B. (1992). Telerobotics, automation, and human supervisory control, The MIT Press.
- SINCLAIR, M. et MORGAN, M. (1981). An investigation of multi-axis isometric side-arm controllers in a variable stability helicopter. Flight Research Laboratory report NAE-LR-606, NRC No. 19629, National Research Council of Canada, National Aeronautical Establishment, Ottawa, Canada.
- SNODDY, G.S. (1926). Learning and stability. Journal of Applied Psychology, Vol. 10, No. 1, 1-36.
- STANNEY, K.M., MOURANT, R. et KENNEDY, R.S. (1998). Human factors issues in virtual environments. Presence: Teleoperators & Virtual Environments, Vol. 7, No. 4, 327-351.

- STARK, L. (1987). Telerobotics for the evolving space station: research needs and outstanding problems. Proceedings of a NASA Symposium on Human Factors in Automated and Robotic Systems, Washington, D.C., 292-319.
- STARK, L., KIM, W.S., TENDICK, F., HANNAFORD, B., ELLIS, S. et al. (1987b). Telerobotics: display, control, and communication problems. IEEE Journal of Robotics and Automation, Vol. RA-3, No. 1, 67-75.
- STATEN, K.E. et THEURER, B.W. (1970). F-104D Side stick control system. Proceedings of the 14th Symposium of the Society of Experimental Test Pilots, Beverly Hills, 199-219.
- TACHI, S. et YASUDA, K. (1994). Evaluation experiments of a teleexistence manipulation system. Presence: Teleoperators & Virtual Environments, Vol. 3, No. 1, 35-44.
- TURCOTTE, P. (1998). Application des technologies robotiques aux équipements forestiers (ATREF). Communiqué Technique no.: Général-63, Institut canadien de recherche en génie forestier (FERIC), Division de l'est.
- U.S. GOVERNMENT (1991). MIL-STD-1472D, notice 1: human engineering design criteria for military systems, equipment, and facilities, Department of Defense, Naval Publications and Forms Center.
- VERTUT, J. et COIFFET, P. (1984). Téléopération: évolution des technologies, série Les robots, tome 3A, Hermès, Paris.
- VERTUT, J. et COIFFET, P. (1985). Téléopération: vers la téléopération assistée par ordinateur, série Les robots, tome 3B, Hermès, Paris.
- WALLERSTEINER, U., STAGER, P. et LAWRENCE, P.D. (1988). A human factors evaluation of teleoperator hand controllers. Proceedings of The International Symposium on Teleoperation and Control, Bristol, England, 291-296.
- WALLERSTEINER, U., LAWRENCE, P.D. et SAUDER, B. (1993). A human factors evaluation of two different machine control systems for log loaders. Ergonomics, Vol. 26, No. 8, 927-934.

- WANGER, L.R., FERWERDA, J.A. et GREENBERG, D.P. (1992). Perceiving spatial relationships in computer-generated images. IEEE Computer Graphics & Applications, Vol. 12, No. 5, 44-58.
- WARE, C. et JESSOME, D.R. (1988 November). Using the bat: a six-dimensional mouse for object placement. IEEE Computer Graphics & Applications, 65-70.
- WARE, C., ARTHUR, K.W. et BOOTH, K.S. (1993). Evaluating 3D task performance for fish tank virtual worlds. ACM Transactions on Information Systems, Vol. 11, No. 3., 239-265.
- WARE, C. et BALAKRISHNAN, R. (1994). Reaching for objects in VR displays: lag and frame rate. ACM Transactions on Computer-Human Interaction, Vol. 1, No. 4, 331-356.
- WARE, C. (1995). Dynamic stereo displays. Proceedings of CHI' 95, ACM Conference on Human Factors in Computing Systems, 310-316.
- WARGO, M.J. (1967). Human operator response speed, frequency, and flexibility: a review and analysis. Human Factors, Vol. 9, No. 3, 221-238.
- WELCH, R.B., BLACKMIN, T.T., LIU, A., MELLERS, B.A. et STARK, L.W. (1996). The effects of pictorial realism, delay of visual feedback, and observer interactivity on the subjective sense of presence. Presence: Teleoperators and Virtual Environments, Vol. 5, No. 3, 263-273.
- WHEELER, D.J. (1988). Understanding industrial experimentation, 2th edition, Statistical Process Control Press Inc., Knoxville, Tennessee, USA.
- WHITNEY, D.E. (1969). Resolved motion rate control of manipulators and human prostheses. IEEE Transactions on Man-Machine Systems, Vol. 10, No. 2, 47-53.
- WICKENS, C.D. (1992). Engineering psychology and human performance, 2nd edition, Harper-Collins, New-York.
- WICKENS, C.D., MERWIN, D.H. et LIN, E.L. (1994). Implications of graphics enhancements for the visualization of scientific data: dimensional integrality, stereopsis, motion, and mesh. Human Factors, Vol. 36, No. 1, 44-61.

- WORRINGHAM, C.J. et BERNING, D.B. (1989). Operator orientation and compatibility in visual-motor task performance. Ergonomics, Vol. 32, No. 4, 387-399.
- ZELTER, D. (1992). Autonomy, interaction, and presence. Presence: Teleoperators and Virtual Environments, Vol. 1, No. 1, 127-131.
- ZHAI, S. et MILGRAM, P. (1993a). Human performance evaluation of manipulation schemes in virtual environments. Proceedings of the First IEEE Virtual Reality Annual International Symposium (VRAIS), Seattle, USA, 155-161.
- ZHAI, S. et MILGRAM, P. (1993b). Human performance evaluation of isometric and elastic rate controllers in a 6 DOF tracking task. Proceedings of SPIE Vol. 2057 Telemanipulator Technology, Boston, 130-141.
- ZHAI, S. (1993c). Investigation of feel for 6 DOF inputs: isometric and elastic rate control for manipulation in 3D environments. Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society 37th Annual Meeting, Seattle, USA, 323-327.
- ZHAI, S., BUXTON, W. et MILGRAM P. (1994). The "silk cursor": investigating transparency for 3D target acquisition. Proceedings of CHI' 94, ACM Conference on Human Factors in Computing Systems, Boston, 459-464.
- ZHAI, S. (1995). Human performance in six degree of freedom input control. Doctoral thesis, Department of Industrial Engineering, University of Toronto.  
[http://vered.rose.utoronto.ca/people/shumin\\_dir/publications.html](http://vered.rose.utoronto.ca/people/shumin_dir/publications.html)
- ZHAI, S. et MILGRAM, P. (1998). Quantifying coordination in multiple DOF movement and its application to evaluating 6 DOF input devices. Proceedings of CHI' 98, ACM Conference on Human Factors in Computing Systems, Los Angeles, USA, 320-327.

## ANNEXE 1 - Loi de Fitts

La loi de Fitts peut être énoncée ainsi:

Le temps nécessaire pour pointer une cible de taille **W** située à une distance **D** du point de départ (figure A.1) est prédit par le modèle mathématique suivant:

$$\text{Temps de pointage} = C_1 + C_2 \log_2 (D/W + 1,0) = C_1 + C_2 (\text{ID}) \quad \text{où} \quad D > W \quad \text{et}$$

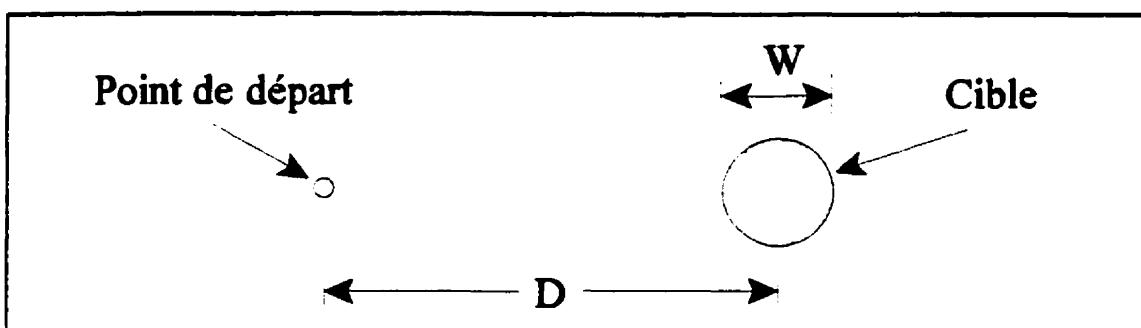


Figure A.1 Illustration du pointage

**C<sub>1</sub>** représente la somme du temps de réaction (qui varie entre 100 et 200 ms) et du temps requis pour confirmer l'acquisition de cible, par exemple en appuyant sur un bouton [Ware, 1994].

**C<sub>2</sub>** est une constante déterminée de façon expérimentale et son inverse (1/C<sub>2</sub>) est appelée indice de performance et est exprimé en bits par seconde. Cette unité de mesure provient du fait que la loi de Fitts tire son origine de la théorie de l'information.

Finalement, **ID** est appelé "indice de difficulté" et est égal à  $\log_2 (D/W + 1,0)$

La taille **W** est généralement calculée comme étant l'épaisseur de la cible selon l'axe reliant le point de départ à celle-ci. Dans le cas d'une cible assymétrique (un rectangle par exemple), on prend **W** comme étant la taille du plus petit côté. Pour éviter tout problème, il est préférable de prendre une cible sphérique (cercle en 2D, sphère en 3D). À ce moment, **W** représente le diamètre de celle-ci.

Lorsque la cible est de nature ponctuelle, la relation tient toujours, sauf que la taille **W** utilisée est celle du curseur [Kabbash, 1995].

Une autre définition utilisée pour la taille de la cible est la "taille effective de cible", qui représente la précision obtenue par 95% des sujets lors des essais (ce qui suppose un taux d'erreur implicite de 5%). Ce concept procure une meilleure précision que la distance à la cible lorsque vient le temps d'évaluer le traitement d'information nécessaire pour évaluer la tâche [Ware, 1994].

Finalement, en téléopération et en simulation graphique, il faut tenir compte de certains délais inévitables comme le temps de calcul ou les délais de transmission qui modifient la performance. Une manière de prendre en compte ces délais a été proposée [Ware, 1994] et consiste à modifier la loi de Fitts de la manière suivante:

Temps de mouvement =  $C_1 + C_2 (C_3 + \text{délai machine}) \log_2 (D/W + 1,0)$  où

$C_3$  représente le temps de traitement humain requis pour effectuer un mouvement de correction

Dans le cas de la simulation graphique, le délai machine est donnée par:

**délai machine** = délai d'acquisition de commande + 0,75\*période de rafraîchissement de l'écran<sup>33</sup>

---

<sup>33</sup> Lorsqu'on utilise l'affichage à double tampon, on doit ajouter au délai machine une autre période de rafraîchissement de l'écran, c'est-à-dire utiliser un coefficient de 1,75 plutôt que 0,75.

## ANNEXE 2 - Loi de la pratique

La loi de la pratique [Snoddy, 1926; DeJong, 1957; Card, 1978; Newell, 1981; Card, 1983] est un modèle empirique utilisé pour prédire le temps nécessaire pour exécuter une tâche à la  $n$ ème répétition. Il s'agit en fait d'une courbe exponentielle inversée de la forme:

$$T_n = T_1 n^{-\alpha} \quad \text{où}$$

$\alpha$  est appelé coefficient d'apprentissage et varie généralement entre 0,2 et 0,6.

$T_1$  est le temps nécessaire pour compléter la tâche la première fois.

$T_n$  représente le temps nécessaire pour compléter la tâche à la  $n$ ème pratique.

La figure A.2 ci-dessous illustre de façon générale l'allure d'une telle courbe.

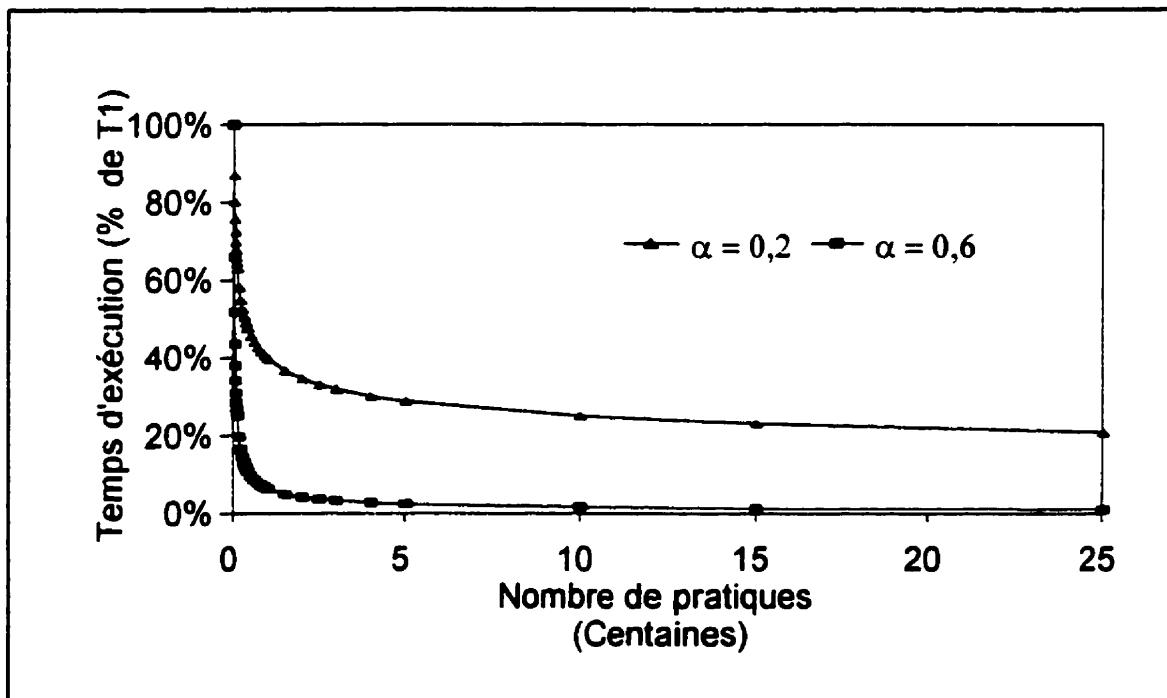


Figure A.2 Illustration de la loi de la pratique

En bref, on peut donc dire que si le temps d'exécution d'une tâche peut être prédict à l'aide de la loi de la pratique, alors le coefficient  $\alpha$  peut être utilisé pour caractériser le temps d'apprentissage.

### ANNEXE 3 -Modèles géométriques directs et inverses du téléopérateur

Le modèle géométrique direct d'un bras manipulateur est un ensemble de fonctions mathématiques qui permettent de déterminer la position et l'orientation d'un repère fixé à l'organe terminal (l'outil) d'un bras manipulateur relativement à un référentiel absolu (qui peut être cartésien cylindrique ou autre), dont l'origine est généralement située à la base du bras manipulateur.

De la même manière, le modèle géométrique inverse est un ensemble de fonction qui permettent de déterminer la configuration (un point dans l'espace articulaire) nécessaire pour obtenir une certaine pose (position et orientation) du repère outil dans le référentiel choisi.

Soit  $X = (q_1, q_2, q_3, q_4, q_5, q_6)$  un vecteur à 6 composantes qui représente la position et l'orientation du repère outil du bras manipulateur, ainsi que  $\Theta = (\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4)$  un vecteur à 4 composantes qui représente les positions des différentes articulations de ce bras manipulateur, tel qu'illustré à la figure A-3. En termes mathématiques, on notera

$X = f(\Theta)$  pour le modèle géométrique direct et

$\Theta = f^{-1}(X)$  pour le modèle géométrique inverse

Il peut n'exister aucune, une seule ou encore plusieurs solutions au problème de géométrie inverse. Dans notre cas, il n'existe qu'une solution possible à l'intérieur du volume de travail du bras manipulateur parce que les articulations ont des étendues de mouvement limitées. Cette propriété de solution unique est appelée résolvabilité [Coiffet, 1992].

Tel qu'expliqué auparavant, nous utiliserons avons mesuré l'impact de trois modes de commande coordonnée en vitesse sur la performance humaine, soit les modes cartésien, cylindrique et tangentiel.

Pour parvenir à effectuer la commande coordonnée selon ces trois modes, on doit d'abord développer les modèles géométriques directs et inverses pour chacun d'entre eux.

Avant de développer ces modèles, voici la géométrie du bras manipulateur utilisé (figure A.3):

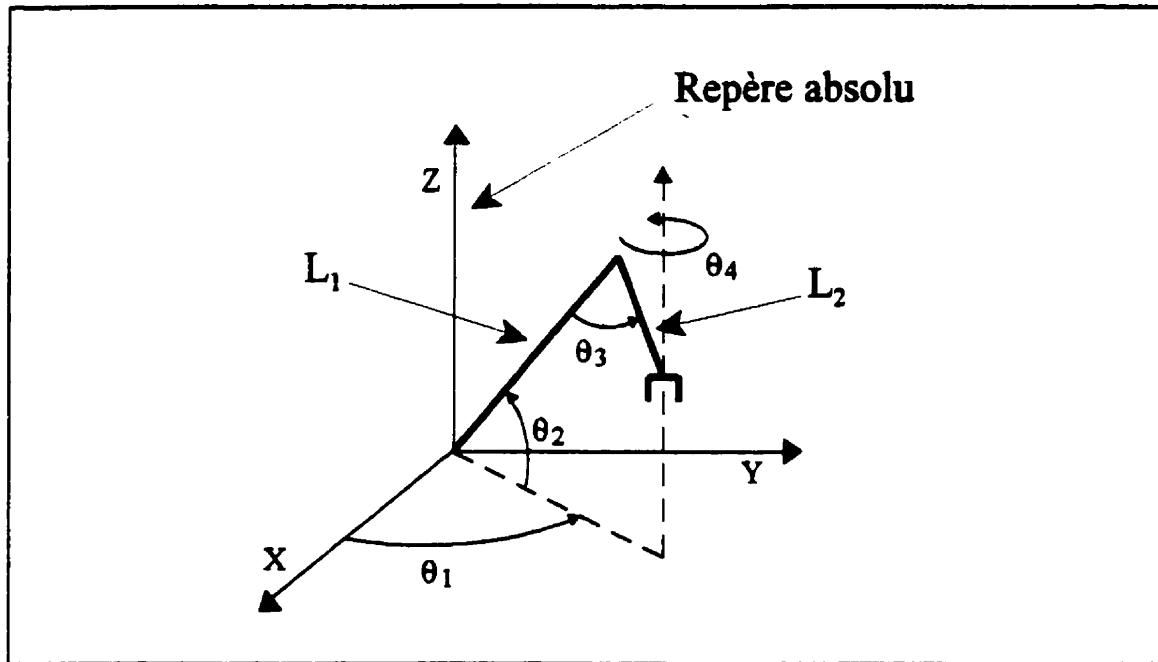


Figure A.3 Géométrie du bras manipulateur

À noter que les limites des mouvements articulaires (appelées butées articulaires) utilisées pour le simulateur sont:

$$-95^\circ < \theta_1 < 95^\circ$$

$$-25^\circ < \theta_2 < 72^\circ$$

$$55^\circ < \theta_3 < 109^\circ$$

$$-180^\circ < \theta_4 < 180^\circ$$

### Cas du mode cartésien

Dans ce cas-ci, le modèle géométrique direct, noté

$$X_{\text{cart}} = f_{\text{cart}}(\Theta)$$

est facilement déterminé. De façon détaillée, nous avons

$$X_{\text{cart}} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ \phi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r \cos \theta_1 \\ r \sin \theta_1 \\ L_1 \sin \theta_2 - L_2 \sin(\theta_2 + \theta_3) \\ \theta_4 \end{bmatrix}$$

où  $r = L_1 \cos \theta_2 - L_2 \cos(\theta_2 + \theta_3)$  et

$X_{\text{cart}} = (x, y, z, \phi)^T$  représente la position et l'orientation du repère outil dans le référentiel cartésien illustré à la figure A-4 ci-dessous.

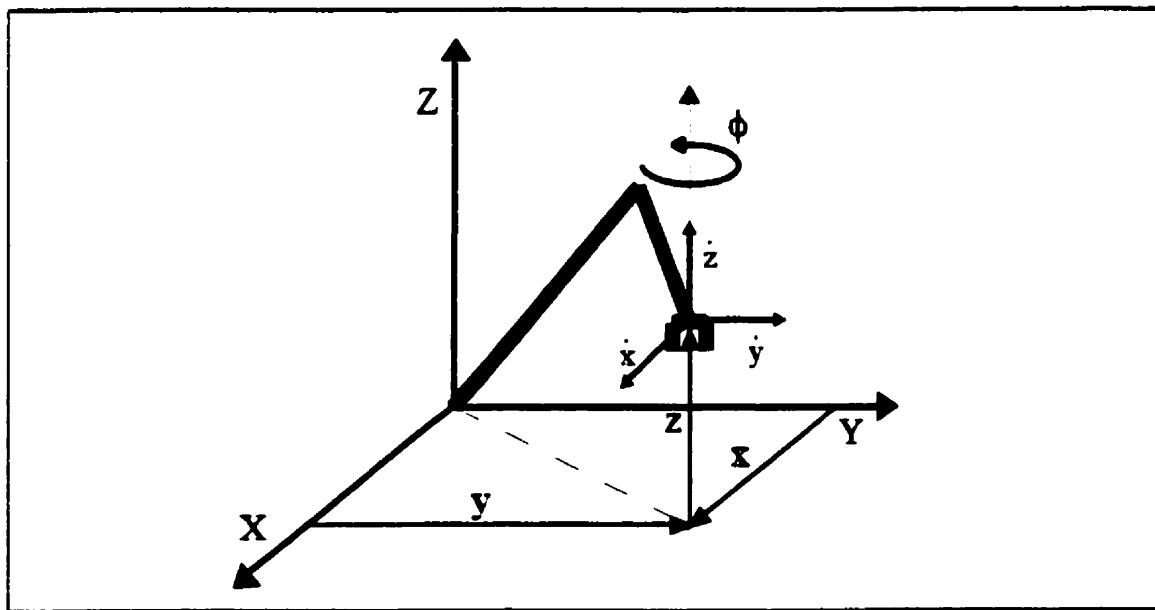


Figure A.4 Illustration du référentiel cartésien

La résolution du modèle géométrique inverse est un peu plus complexe. Ainsi, en se basant sur la figure A.4, on obtient

$$\theta_1 = \text{atan}(y/x)$$

$$\theta_4 = \phi$$

Maintenant, on peut calculer  $\theta_3$  en résolvant le triangle formé par les membrures  $L_1$ ,  $L_2$  et la droite reliant la base du bras manipulateur (origine du repère absolu) au point outil (origine du repère outil) à la figure A.5, de longueur égale à  $(x^2 + y^2 + z^2)^{1/2}$ . Ainsi, par la loi du cosinus, donnée par

$$C^2 = A^2 + B^2 - 2AB \cos \gamma \quad \text{où} \quad A = L_1, \quad B = L_2 \quad \text{et} \quad C = r^2 + z^2 = x^2 + y^2 + z^2$$

On obtient

$$\theta_3 = \gamma = \text{acos} [ (L_1^2 + L_2^2 - (x^2 + y^2 + z^2)) / (2L_1 L_2) ]$$

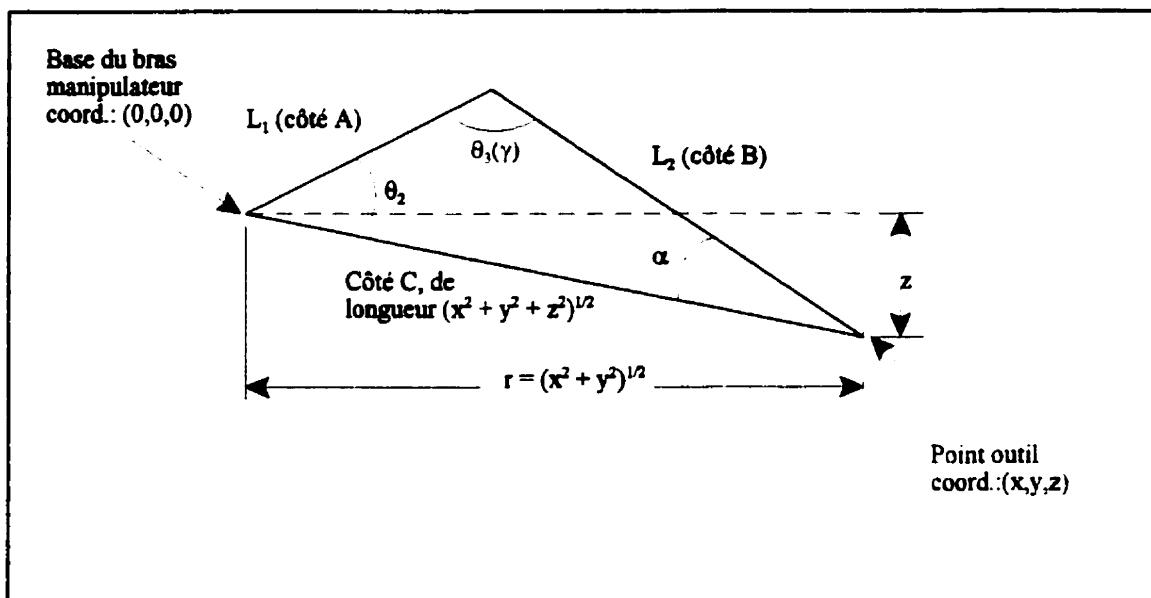


Figure A.5 Résolution trigonométrique de la géométrie inverse

Finalement, en poursuivant la résolution du triangle, on trouve

$$A^2 = B^2 + C^2 - 2BC \cos \alpha$$

$$\alpha = \arccos [(b^2 + C^2 - A^2) / (2BC)] = \arccos [L_2^2 + (r^2 + z^2) - L_1^2] / (2L_2(r^2 + z^2)^{1/2})$$

$$\theta_2 = 180 - \theta_3 - \alpha + \arctan(z/r)$$

Donc, en résumé, le modèle géométrique inverse dans le référentiel cartésien est donné par:

$\Theta = f^{-1}_{\text{cart}}(X_{\text{cart}})$  ou plus exactement:

$$\Theta = \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \\ \theta_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \arctan(y/x) \\ 180 - \theta_3 - \alpha \cos[(L_2^2 + r^2 + z^2 - L_1^2) / (2L_2(r^2 + z^2)^{1/2})] + \alpha \tan(z/r) \\ \alpha \cos[(L_1^2 + L_2^2 - (r^2 + z^2)) / (2L_1L_2)] \\ \phi \end{bmatrix}$$

où  $r = (x^2 + y^2)^{1/2}$

### Cas du mode cylindrique

Dans ce cas-ci, le modèle géométrique direct, noté

$$\mathbf{X}_{\text{cyl}} = f_{\text{cyl}}(\Theta)$$

est facilement déterminé. De façon détaillée, nous avons

$$\mathbf{X}_{\text{cart}} = \begin{bmatrix} \theta \\ r \\ z \\ \phi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta_1 \\ L_1 \cos(\theta_2 - L_2 \cos(\theta_2 + \theta_3)) \\ L_1 \sin(\theta_2 - L_2 \sin(\theta_2 + \theta_3)) \\ \theta_1 + \theta_4 \end{bmatrix}$$

où  $\mathbf{X}_{\text{cyl}} = (\theta, r, z, \phi)^T$  représente la position et l'orientation du repère outil dans le référentiel cylindrique, tel qu'illustre à la figure A.6 ci-dessous.

La résolution du modèle géométrique inverse est un peu plus complexe. En se basant sur la figure A.6 et les calculs effectués dans le cas du référentiel cartésien, on obtient

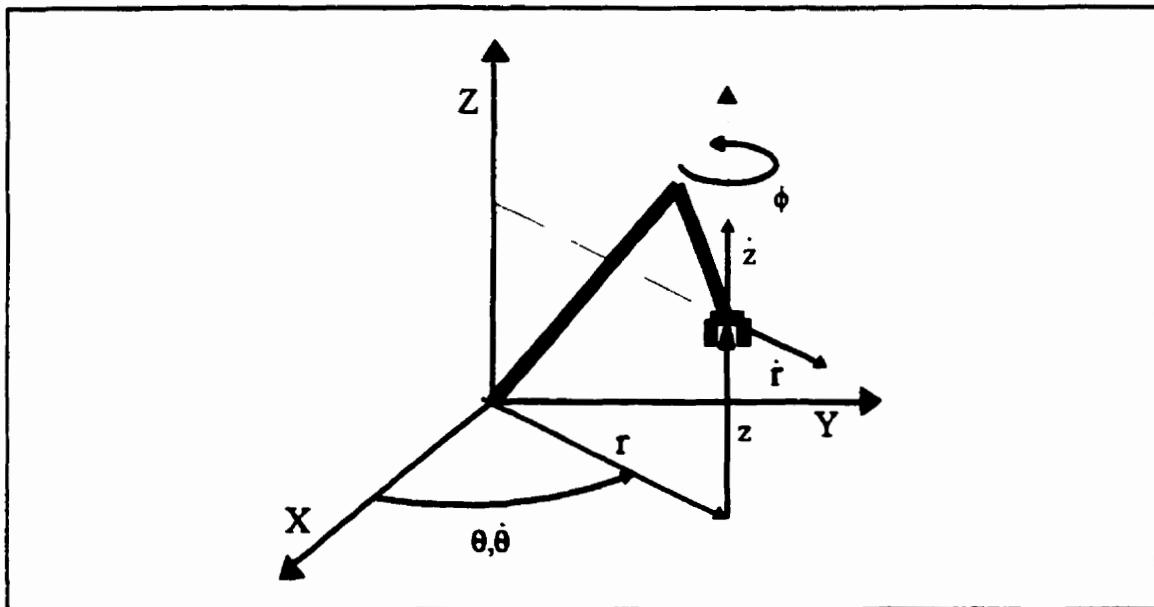


Figure A.6 Illustration du référentiel cylindrique

$$\Theta = \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \\ \theta_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta \\ 180 - \theta_3 - \alpha \cos[(L_2^2 + r^2 + z^2 - L_1^2)/(2L_2(r^2 + z^2)^{1/2})] + \alpha \tan(z/r) \\ \alpha \cos[(L_1^2 + L_2^2 - (r^2 + z^2))/(2L_1L_2)] \\ \phi - \theta \end{bmatrix}$$

### Cas du mode tangentiel

Dans ce cas-ci, le modèle géométrique direct, noté

$$X_{\text{tang}} = f_{\text{tang}}(\Theta)$$

est facilement déterminé. De façon plus détaillée, nous avons

$$X_{\text{tang}} = \begin{bmatrix} t \\ r \\ z \\ \phi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t \\ r\theta_1 \\ L_1 \cos\theta_2 - L_2 \cos(\theta_2 + \theta_3) \\ L_1 \sin\theta_2 - L_2 \sin(\theta_2 + \theta_3) \\ \theta_1 + \theta_4 \end{bmatrix}$$

où  $X_{\text{tang}} = (t, r, z, \phi)^T$  représente la position et l'orientation du repère outil dans le référentiel tangentiel, tel qu'illustré ci-dessous à la figure A.7.

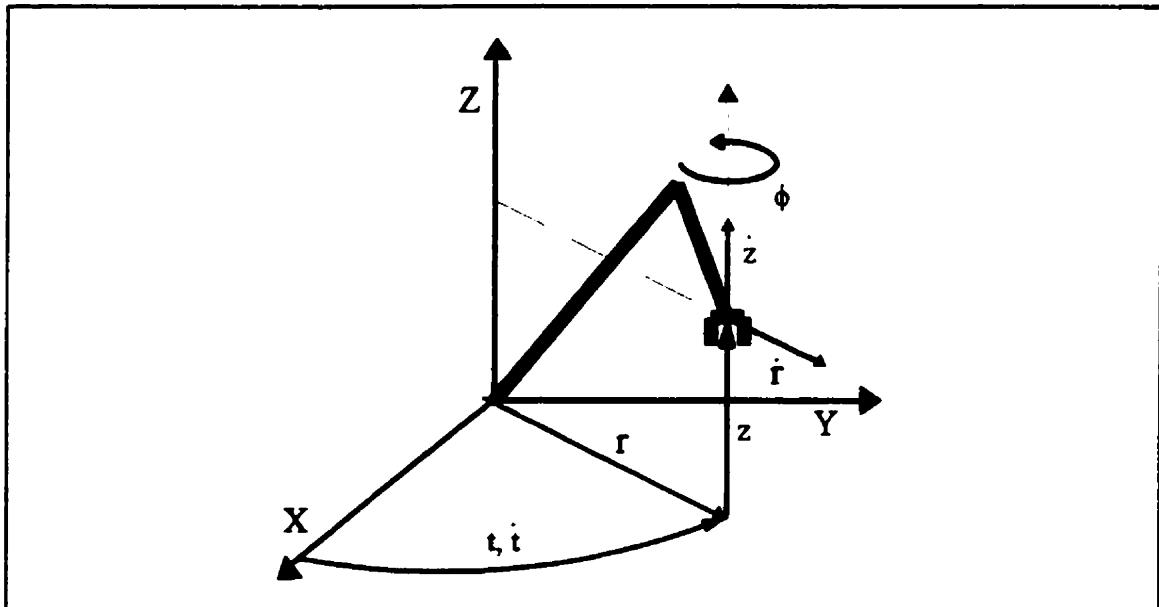


Figure A.7 Illustration du référentiel tangentiel

La résolution du modèle géométrique inverse est un peu plus complexe. En se basant sur la figure A.7 et les calculs effectués dans le cas du référentiel cylindrique, on obtient

$$\Theta = \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \\ \theta_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t/r \\ 180 - \theta_3 - \alpha \cos[(L_2^2 + r^2 + z^2 - L_1^2)/(2L_2(r^2 + z^2)^{1/2})] + \alpha \tan(z/r) \\ \alpha \cos[(L_1^2 + L_2^2 - (r^2 + z^2))/(2L_1L_2)] \\ \phi - t/r \end{bmatrix}$$

#### ANNEXE 4 - Modèles cinématiques directs et inverses du téléopérateur

Les modèles cinématiques directs et inverses d'un bras manipulateur sont un ensemble de fonctions mathématiques qui permettent de relier la vitesse de déplacement et de rotation d'un repère fixé à l'organe terminal (l'outil) du bras manipulateur aux vitesses articulaires.

Ces modèles cinématiques sont obtenus en dérivant les modèles géométriques directs et inverses. Ainsi, on obtient

$$\dot{X} = J(\Theta) \dot{\Theta} \longrightarrow \text{Modèle cinématique direct}$$

$$\dot{\Theta} = J^{-1}(X) \dot{X} \longrightarrow \text{Modèle cinématique inverse}$$

où le terme  $J$ , appelé jacobien inverse représente en fait  $dX/d\Theta$ , tandis que  $J^{-1}$  correspond au jacobien inverse et représente  $d\Theta/dX$ .

En termes plus détaillés, le modèle cinématique direct est donné par

$$\dot{X} = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} = J \dot{\Theta} = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial \theta_1} & \frac{\partial x}{\partial \theta_2} & \frac{\partial x}{\partial \theta_3} & \frac{\partial x}{\partial \theta_4} \\ \frac{\partial y}{\partial \theta_1} & \frac{\partial y}{\partial \theta_2} & \frac{\partial y}{\partial \theta_3} & \frac{\partial y}{\partial \theta_4} \\ \frac{\partial z}{\partial \theta_1} & \frac{\partial z}{\partial \theta_2} & \frac{\partial z}{\partial \theta_3} & \frac{\partial z}{\partial \theta_4} \\ \frac{\partial \phi}{\partial \theta_1} & \frac{\partial \phi}{\partial \theta_2} & \frac{\partial \phi}{\partial \theta_3} & \frac{\partial \phi}{\partial \theta_4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \\ \dot{\theta}_4 \end{bmatrix}$$

tandis que le modèle cinématique inverse est donné par

$$\dot{\Theta} = \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \\ \dot{\theta}_4 \end{bmatrix} = J^{-1} \dot{X} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \theta_1}{\partial x} & \frac{\partial \theta_1}{\partial y} & \frac{\partial \theta_1}{\partial z} & \frac{\partial \theta_1}{\partial \phi} \\ \frac{\partial \theta_2}{\partial x} & \frac{\partial \theta_2}{\partial y} & \frac{\partial \theta_2}{\partial z} & \frac{\partial \theta_2}{\partial \phi} \\ \frac{\partial \theta_3}{\partial x} & \frac{\partial \theta_3}{\partial y} & \frac{\partial \theta_3}{\partial z} & \frac{\partial \theta_3}{\partial \phi} \\ \frac{\partial \theta_4}{\partial x} & \frac{\partial \theta_4}{\partial y} & \frac{\partial \theta_4}{\partial z} & \frac{\partial \theta_4}{\partial \phi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \\ \dot{\phi} \end{bmatrix}$$

Les termes du jacobien et du jacobien inverse varient selon la pose du bras manipulateur et doivent donc être évalués chaque fois que celle-ci varie. Cette évaluation se fait en dérivant les modèles géométriques de façon numérique ou analytique.,

Pour les fins d'animation graphique du simulateur utilisé dans cette thèse, seuls les modèles cinématiques inverses sont requis. On obtient ainsi, selon le mode de commande utilisé, les modèles suivants:

### Commande articulaire

$$\dot{\Theta} = J_{\text{articulaire}}^{-1}(X) \dot{X}_{\text{articulaire}} \quad \text{-----> où } J^{-1} = I^4, \text{ i.e. une matrice identité de taille } 4 \times 4$$

### Commande coordonnée cartésienne

$$\dot{\Theta} = J_{cart}^{-1}(X) \dot{X}_{cart} \quad \longrightarrow \text{ où}$$

$$\dot{\Theta} = \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \\ \dot{\theta}_4 \end{bmatrix} = J_{cart}^{-1} \dot{X}_{cart} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \theta_1}{\partial x} & \frac{\partial \theta_1}{\partial y} & \frac{\partial \theta_1}{\partial z} & \frac{\partial \theta_1}{\partial \phi} \\ \frac{\partial \theta_2}{\partial x} & \frac{\partial \theta_2}{\partial y} & \frac{\partial \theta_2}{\partial z} & \frac{\partial \theta_2}{\partial \phi} \\ \frac{\partial \theta_3}{\partial x} & \frac{\partial \theta_3}{\partial y} & \frac{\partial \theta_3}{\partial z} & \frac{\partial \theta_3}{\partial \phi} \\ \frac{\partial \theta_4}{\partial x} & \frac{\partial \theta_4}{\partial y} & \frac{\partial \theta_4}{\partial z} & \frac{\partial \theta_4}{\partial \phi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \\ \dot{\phi} \end{bmatrix}$$

### Commande coordonnée cylindrique

$$\dot{\Theta} = J_{cyl}^{-1}(X) \dot{X}_{cyl} \quad \longrightarrow \text{ où}$$

$$\dot{\Theta} = \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \\ \dot{\theta}_4 \end{bmatrix} = J_{cyl}^{-1} \dot{X}_{cyl} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \theta_1}{\partial \theta} & \frac{\partial \theta_1}{\partial r} & \frac{\partial \theta_1}{\partial z} & \frac{\partial \theta_1}{\partial \phi} \\ \frac{\partial \theta_2}{\partial \theta} & \frac{\partial \theta_2}{\partial r} & \frac{\partial \theta_2}{\partial z} & \frac{\partial \theta_2}{\partial \phi} \\ \frac{\partial \theta_3}{\partial \theta} & \frac{\partial \theta_3}{\partial r} & \frac{\partial \theta_3}{\partial z} & \frac{\partial \theta_3}{\partial \phi} \\ \frac{\partial \theta_4}{\partial \theta} & \frac{\partial \theta_4}{\partial r} & \frac{\partial \theta_4}{\partial z} & \frac{\partial \theta_4}{\partial \phi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{r} \\ \dot{z} \\ \dot{\phi} \end{bmatrix}$$

### Commande coordonnée tangentielle

$$\dot{\Theta} = J_{\text{tang}}^{-1}(X)\dot{X}_{\text{tang}} \quad \longrightarrow \text{ où}$$

$$\dot{\Theta} = \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \\ \dot{\theta}_4 \end{bmatrix} = J_{\text{tang}}^{-1} \dot{X}_{\text{tang}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \theta_1}{\partial t} & \frac{\partial \theta_1}{\partial r} & \frac{\partial \theta_1}{\partial z} & \frac{\partial \theta_1}{\partial \phi} \\ \frac{\partial \theta_2}{\partial t} & \frac{\partial \theta_2}{\partial r} & \frac{\partial \theta_2}{\partial z} & \frac{\partial \theta_2}{\partial \phi} \\ \frac{\partial \theta_3}{\partial t} & \frac{\partial \theta_3}{\partial r} & \frac{\partial \theta_3}{\partial z} & \frac{\partial \theta_3}{\partial \phi} \\ \frac{\partial \theta_4}{\partial t} & \frac{\partial \theta_4}{\partial r} & \frac{\partial \theta_4}{\partial z} & \frac{\partial \theta_4}{\partial \phi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i \\ r \\ z \\ \phi \end{bmatrix}$$

Pour les besoins de l'animation du simulateur graphique, les dérivées partielles des jacobiens inverses sont calculées de façon numérique (voir ci-dessous). Cette méthode donne des résultats satisfaisants en raison du temps de calcul constant qui résulte de cette façon de faire comparativement à la méthode analytique où la l'évaluation des termes du jacobien inverse demande un temps de calcul variable selon le mode de commande utilisé.

### Calcul de la dérivée numérique d'une fonction f(x)

$$f'(x) = \frac{f(x+h) - f(x)}{h} \quad \text{où}$$

h est choisi pour être la plus petite valeur possible qui permette d'atteindre la précision recherchée [Press, 1992].

### Algorithme d'animation graphique du simulateur

Une animation graphique est effectuée en réalisant une succession rapide d'images statiques. Pour qu'une animation semble réaliste, la fréquence d'affichage des scènes doit atteindre ou dépasser 15 Hz, tel que spécifié précédemment.

Dans le cas de notre simulateur graphique, du moment que les positions articulaires du bras manipulateur sont connues, il n'y a qu'à dessiner la scène correspondante. On doit donc être en mesure de calculer les positions articulaires pour chacune des images affichées.

Or, ces positions changent constamment car l'opérateur déplace le bras manipulateur à l'aide des dispositifs de commande.

On doit donc dans un premier temps échantillonner les signaux qui proviennent de chacun des quatre ddl de l'interface de commande. On normalise ensuite la valeur des différents signaux de commande dans l'intervalle  $[-1, 1]$ , selon l'étendue de déplacement permise pour chacun des ddl. On poursuit les transformations en appliquant la fonction de gain choisie (linéaire, exponentielle ou autre).

Vient alors le moment de calculer les vitesses de déplacement articulaires à l'aide du modèle cinématique inverse approprié (qui dépend du mode de commande en vitesse choisi). Finalement, on doit s'assurer qu'en aucun temps les vitesses articulaires calculées ne dépassent les limites physiques du téléopérateur, grâce à une mise à l'échelle.

Pour bien comprendre la méthode de calcul des vitesses articulaires, la figure A.8 ci-dessous illustre le tout sous forme de schéma-bloc.

Une fois ces calculs effectués, les nouvelles positions articulaires sont données par

$$\Theta_{i+1} = \Theta_i + \dot{\Theta} \Delta t \quad \text{où}$$

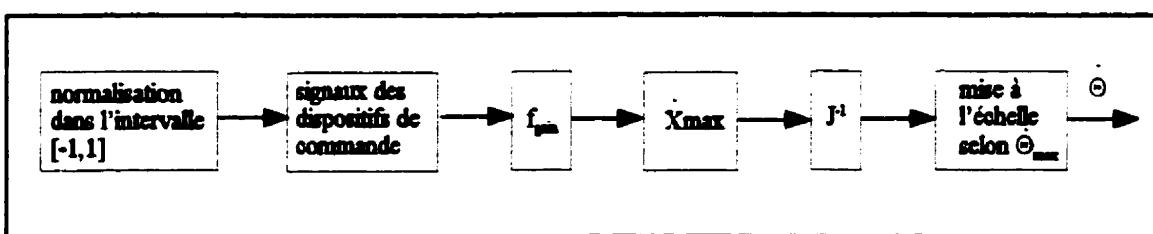


Figure A.8 Calcul des vitesses articulaires à partir des signaux de commande

$\Delta t$  correspond au temps écoulé entre deux images et  $\Theta$  aux vitesses articulaires commandées à l'aide des dispositifs de commande (selon la méthode illustrée à la figure A-8).

### Mise à l'échelle des vitesses angulaires

Pour que la simulation graphique soit réaliste, celle-ci doit respecter les vitesses articulaires maximales du téléopérateur. Pour y parvenir, nous procédons de la façon suivante:

Si une ou plusieurs des vitesses angulaires dépasse la vitesse angulaire permise, on effectue une mise à l'échelle pour éviter de dépasser les vitesses angulaires permises. En termes mathématiques, on a

$$\text{Si } \max\left(\frac{|\dot{\Theta}|}{\dot{\Theta}_{\max}}\right) > 1 \quad \text{où} \quad \dot{\Theta}_{\max} = [20 \quad 20 \quad 20 \quad 90]^T \text{ °/s}$$

Alors,

$$\dot{\Theta}_{\text{réel}} = \frac{\dot{\Theta}}{\max\left(\frac{|\dot{\Theta}|}{\dot{\Theta}_{\max}}\right)}$$

où  $\dot{\Theta}_{\text{réel}}$  représente les nouvelles vitesses angulaires, normalisées pour ne pas dépasser les vitesses articulaires maximales permises.

Pour conclure, si certaines articulations se retrouvent hors des limites articulaires permises (définies à l'annexe 3), on les bloquent sur place en définissant  $\dot{\Theta}_{t-1} = \dot{\Theta}_t$ .

**ANNEXE 5 - Données expérimentales de l'étude comparative des interfaces**

Critère de performance: temps de mouvement (s)      Tâche: 1      Moyenne des distances 1 et 2

sujet	2 manettes x 2 ddl		1 manette x 4 ddl						mode	
	art.	cyl.	cartésien		cylindrique		tangential			
	linéaire		lin.	exp.	lin.	exp.	lin.	exp.		
	1	2	3	4	5	6	7	8	combinaison	
1	64,38	43,03	18,14	13,87	22,19	18,55	15,54	12,89		
2	56,46	37,43	27,81	22,81	32,18	30,27	17,74	18,24		
3	82,84	43,84	21,05	22,83	13,57	14,86	21,10	27,47		
4	32,93	66,13	41,24	24,35	16,36	15,07	14,03	16,31		
5	38,37	36,07	14,32	18,21	18,13	29,67	16,69	18,80		
6	41,24	36,54	18,74	19,67	21,89	25,53	15,69	32,47		
7	34,78	19,32	13,91	10,76	8,77	10,89	9,04	11,63		
8	44,58	28,62	20,84	31,09	14,56	18,50	20,11	16,76		
9	37,74	25,26	18,88	20,51	25,73	23,35	16,00	15,94		
10	39,89	22,74	14,80	19,16	18,68	19,87	19,52	20,24		
11	11,67	8,90	4,32	6,46	5,88	5,92	12,09	9,93		
12	25,17	25,58	10,97	16,56	14,93	18,63	20,85	21,27		
R	71,17	57,23	36,92	24,63	26,31	24,35	12,07	22,54	$\bar{R} = 34,40$	
$\bar{x}$	42,50	32,79	18,75	18,85	17,74	19,26	16,53	18,49	$\bar{\bar{x}} = 23,11$	
$s^2$	312,9	197,0	77,11	38,71	47,42	47,70	12,24	37,73	$s^2_{total} = 173,25$	

Tableau d'analyse de la variance

	SS	DF	MS	F
INTER	7978,86	7	1139,84	11,83
INTRA	8479,45	88	96,36	
TOTALE	16458,32	95		

Il y a une différence significative entre les groupes ( $p < 0,05$ ), car  $F(7;88; 0,05) = 2,13$

Critère de performance: temps de mouvement (s)      Tâche: 2      Moyenne des Distances 1 et 2

sujet	2 manettes x 2 ddl		1 manette x 4 ddl						mode	
	art.	cyl.	cartésien		cylindrique		tangential			
	linéaire		lin.	exp.	lin.	exp.	lin.	exp.		
	1	2	3	4	5	6	7	8	combinaison	
1	39,88	19,46	8,71	5,72	12,23	10,40	8,89	8,25		
2	41,61	40,77	24,94	23,38	30,31	32,94	13,55	20,82		
3	85,68	43,28	12,98	14,63	11,70	16,40	23,04	19,68		
4	23,95	48,50	14,84	23,82	9,87	9,86	15,66	11,09		
5	64,12	35,01	15,34	17,15	19,76	25,25	19,26	21,79		
6	19,34	37,36	7,17	15,42	13,62	17,39	14,93	19,15		
7	23,74	16,91	11,03	8,66	10,84	10,92	11,87	13,56		
8	18,51	12,89	14,08	25,66	9,61	13,53	10,16	8,10		
9	22,27	24,57	10,12	16,02	16,02	18,33	13,37	14,78		
10	26,37	15,27	10,12	13,05	15,71	20,86	15,94	21,19		
11	9,46	10,96	4,61	6,16	5,80	5,66	10,24	8,19		
12	14,97	16,03	5,19	6,69	10,58	8,96	12,51	38,66		
R	76,22	37,54	20,34	19,94	24,51	27,28	14,16	30,56	$\bar{R} = 31,32$	
$\bar{x}$	32,49	26,75	11,59	14,70	13,84	15,87	14,12	17,10	$\bar{x} = 18,31$	
$s^2$	455,4	163,9	27,77	45,31	36,64	55,07	14,92	68,42	$s^2_{total} = 155,36$	

Tableau d'analyse de la variance

	SS	DF	MS	F
INTER	5217,61	7	745,37	6,87
INTRA	9541,43	88	108,43	
TOTALE	14759,04	95		

Il y a une différence significative entre les groupes ( $p < 0,05$ ) car  $F(7;88; 0,05) = 2,13$

Critère de performance: taux d'erreur (%)

Tâche: 1

Moyenne des Distances 1 et 2

sujet	2 manettes x 2 ddl		1 manette x 4 ddl						fonction de gain	
	art.	cyl.	cartésien		cylindrique		tangential			
	linéaire		lin.	exp.	lin.	exp.	lin.	exp.		
	1	2	3	4	5	6	7	8	combinaison	
1	41,7	16,7	0,0	8,3	0,0	25,0	8,3	0,0		
2	8,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	8,3		
3	16,7	8,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		
4	0,0	25,0	8,3	16,7	16,7	0,0	0,0	8,3		
5	8,3	8,3	8,3	8,3	8,3	0,0	0,0	0,0		
6	8,3	0,0	8,3	0,0	0,0	16,7	8,3	0,0		
7	58,4	33,4	0,0	8,3	16,7	16,7	16,7	8,3		
8	0,0	33,4	33,3	16,7	25,0	16,7	8,3	25,0		
9	25,0	0,0	8,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		
10	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		
11	0,0	0,0	8,3	16,7	8,3	8,3	8,3	8,3		
12	16,7	8,3	16,7	0,0	0,0	0,0	0,0	8,3		
R	58,4	33,4	33,3	16,7	25,0	25,0	16,7	25,0	$\bar{R} = 29,2$	
$\bar{x}$	15,3	11,1	7,6	6,2	6,2	6,9	4,2	5,6	$\bar{\bar{x}} = 7,9$	
$s^2$	310,6	154,4	86,2	47,7	70,8	79,0	28,9	50,2	$s^2_{total} = 114,8$	

Tableau d'analyse de la variance

	SS	DF	MS	F
INTER	1800,97	7	257,28	2,49
INTRA	9106,69	88	103,49	
TOTALE	10907,66	95		

Il y a une différence significative entre les groupes ( $p < 0,05$ ) car  $F(7;88; 0,05) = 2,13$

Critère de performance: taux d'erreur (%)

Tâche: 2

Moyenne des Distances 1 et 2

sujet	2 manettes x 2 ddl		1 manette x 4 ddl						fonction de gain	
	art.	cyl.	cartésien		cylindrique		tangential			
	linéaire		lin.	exp.	lin.	exp.	lin.	exp.		
	1	2	3	4	5	6	7	8	combinaison	
1	16,7	25,0	16,7	33,3	41,7	16,7	25,0	50,0		
2	58,3	75,0	25,0	16,7	33,3	33,4	16,7	16,7		
3	25,0	0,0	8,3	8,3	0,0	25,0	0,0	8,3		
4	50,0	25,0	0,0	41,7	16,7	41,7	16,7	66,7		
5	25,0	33,4	0,0	8,3	25,0	0,0	0,0	16,7		
6	16,7	33,3	25,0	16,7	25,0	16,7	8,3	16,7		
7	8,3	25,0	25,0	0,0	8,3	25,0	16,7	16,7		
8	25,0	33,4	16,7	33,4	8,3	8,3	25,0	16,7		
9	16,7	16,7	8,3	0,0	16,7	8,3	0,0	0,0		
10	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	8,3		
11	41,7	8,3	8,3	16,7	41,7	33,3	16,7	25,0		
12	41,7	25,0	8,3	0,0	8,3	16,7	25,0	58,3		
R	58,3	75,0	25,0	41,7	41,7	41,7	25,0	66,7	$\bar{R} = 46,9$	
$\bar{x}$	27,1	25,0	11,8	14,6	18,7	18,7	12,5	25,0	$\bar{\bar{x}} = 19,2$	
$s^2$	279,0	358,8	86,3	198,1	197,9	163,3	98,4	416,1	$s^2_{total} = 256,1$	

Tableau d'analyse de la variance

	SS	DF	MS	F
INTER	4549,18	7	649,88	2,89
INTRA	19776,94	88	224,74	
TOTALE	24326,12	95		

Il y a une différence significative entre les groupes ( $p < 0,05$ ) car  $F(7;88; 0,05) = 2,13$

Critère de performance: écart longitudinal (m)      Tâche: 1      Moyenne des Distances 1 et 2

sujet	2 manettes x 2 ddl		1 manette x 4 ddl						mode	
	art.	cyl.	cartésien		cylindrique		tangential			
	linéaire		lin.	exp.	lin.	exp.	lin.	exp.		
	1	2	3	4	5	6	7	8	combinaison	
1	0,020	0,039	0,401	0,118	0,342	0,161	0,083	0,253		
2	0,260	0,184	0,060	0,068	0,057	0,082	0,074	0,079		
3	0,096	0,072	0,057	0,060	0,063	0,053	0,048	0,071		
4	0,222	0,177	0,221	0,236	0,227	0,178	0,215	0,250		
5	0,045	0,048	0,056	0,079	0,037	0,040	0,061	0,040		
6	0,066	0,259	0,078	0,069	0,087	0,095	0,057	0,083		
7	0,156	0,112	0,090	0,108	0,093	0,125	0,097	0,145		
8	0,055	0,014	0,120	0,060	0,047	0,042	0,103	0,084		
9	0,035	0,037	0,053	0,040	0,034	0,024	0,045	0,044		
10	0,125	0,096	0,039	0,041	0,031	0,041	0,032	0,031		
11	0,471	0,243	0,152	0,172	0,162	0,288	0,074	0,172		
12	0,127	0,096	0,108	0,156	0,087	0,085	0,068	0,099		
R	0,452	0,245	0,362	0,197	0,312	0,265	0,183	0,222	$\bar{R} = 0,280$	
$\bar{x}$	0,140	0,115	0,119	0,100	0,105	0,101	0,080	0,112	$\bar{\bar{x}} = 0,109$	
$s^2$	0,015	0,006	0,010	0,003	0,008	0,005	0,002	0,005	$s^2_{total} = 0,00717$	

Tableau d'analyse de la variance

	SS	DF	MS	F
INTER	0,0734	7	0,0105	1,52
INTRA	0,6077	88	0,0069	
TOTALE	0,6811	95		

Il n'y a pas de différence significative entre les groupes ( $p>0,05$ ) car  $F(7,88; 0,05) = 2,13$

Critère de performance: écart longitudinal (m)    Tâche: 2    Moyenne des Distances 1 et 2

sujet	2 manettes x 2 ddl		1 manette x 4 ddl								
	art.	cyl.	cartésien		cylindrique		tangential		mode		
	linéaire		lin.	exp.	lin.	exp.	lin.	exp.	fonction de gain		
	1	2	3	4	5	6	7	8	combinaison		
1	0,239	0,275	0,429	0,419	0,190	0,294	0,298	0,324			
2	0,749	0,976	0,099	0,117	0,071	0,090	0,107	0,145			
3	0,076	0,038	0,034	0,031	0,042	0,037	0,051	0,034			
4	0,423	0,415	0,398	0,468	0,383	0,207	0,338	0,467			
5	0,038	0,080	0,055	0,104	0,081	0,060	0,042	0,031			
6	0,109	0,092	0,144	0,086	0,124	0,101	0,070	0,170			
7	0,089	0,102	0,092	0,069	0,129	0,091	0,088	0,128			
8	0,100	0,093	0,054	0,031	0,060	0,065	0,075	0,097			
9	0,046	0,025	0,079	0,037	0,054	0,064	0,045	0,045			
10	0,063	0,084	0,049	0,068	0,047	0,060	0,042	0,034			
11	0,300	0,274	0,194	0,295	0,385	0,319	0,136	0,256			
12	0,364	0,329	0,455	0,307	0,308	0,262	0,276	0,196			
R	0,712	0,951	0,421	0,437	0,343	0,282	0,296	0,437	$\bar{R} = 0,485$		
$\bar{x}$	0,216	0,232	0,173	0,169	0,156	0,137	0,130	0,160	$\bar{\bar{x}} = 0,172$		
$s^2$	0,042	0,065	0,023	0,023	0,016	0,010	0,011	0,017	$s^2_{total} = 0,02686$		

Tableau d'analyse de la variance

	SS	DF	MS	F
INTER	0,2854	7	0,0408	1,58
INTRA	2,2662	88	0,0258	
TOTALE	2,5516	95		

Il n'y a pas de différence significative entre les groupes ( $p>0,05$ ) car  $F(7;88; 0,05) = 2,13$

Critère de performance: erreur latérale (m)      Tâche: 1      Moyenne des Distances 1 et 2

sujet	2 manettes x 2 ddl		1 manette x 4 ddl						fonction de gain	
	art.	cyl.	cartésien		cylindrique		tangential			
	linéaire		lin.	exp.	lin.	exp.	lin.	exp.		
	1	2	3	4	5	6	7	8	combinaison	
1	0,044	0,058	0,078	0,056	0,098	0,093	0,085	0,107		
2	0,052	0,047	0,068	0,102	0,057	0,087	0,095	0,129		
3	0,096	0,044	0,092	0,074	0,111	0,094	0,111	0,081		
4	0,108	0,122	0,109	0,075	0,104	0,088	0,077	0,055		
5	0,049	0,055	0,081	0,072	0,058	0,045	0,096	0,050		
6	0,094	0,071	0,100	0,079	0,066	0,073	0,088	0,086		
7	0,162	0,103	0,077	0,054	0,096	0,088	0,045	0,069		
8	0,081	0,087	0,117	0,058	0,067	0,076	0,114	0,077		
9	0,055	0,070	0,069	0,031	0,038	0,048	0,072	0,085		
10	0,072	0,063	0,044	0,044	0,032	0,052	0,052	0,047		
11	0,069	0,061	0,121	0,099	0,075	0,084	0,104	0,080		
12	0,108	0,111	0,069	0,081	0,059	0,084	0,091	0,088		
R	0,119	0,077	0,077	0,072	0,080	0,049	0,069	0,082	R = 0,078	
$\bar{x}$	0,082	0,074	0,085	0,069	0,071	0,076	0,086	0,079	$\bar{x} = 0,078$	
$s^2$	1,1e-3	6,0e-4	4,9e-4	4,1e-4	6,0e-4	2,9e-4	4,2e-4	5,0e-4	$s^2_{total} = 5,802e-4$	

Tableau d'analyse de la variance

	SS	DF	MS	F
INTER	0,007161	7	0,001023	1,88
INTRA	0,047954	88	0,000545	
TOTALE	0,055115	95		

Il n'y a pas de différence significative entre les groupes ( $p>0,05$ ) car  $F(7;88; 0,05) = 2,13$

Critère de performance: erreur latérale (m)      Tâche: 2      Moyenne des Distances 1 et 2

sujet	2 manettes x 2 ddl		1 manette x 4 ddl						mode fonction de gain	
	art.	cyl.	cartésien		cylindrique		tangential			
	linéaire		lin.	exp.	lin.	exp.	lin.	exp.		
	1	2	3	4	5	6	7	8	combinaison	
1	0,094	0,092	0,087	0,113	0,075	0,097	0,080	0,094		
2	0,094	0,140	0,096	0,058	0,110	0,045	0,057	0,076		
3	0,073	0,094	0,086	0,132	0,097	0,104	0,103	0,089		
4	0,126	0,067	0,079	0,105	0,110	0,081	0,113	0,155		
5	0,056	0,114	0,057	0,074	0,078	0,099	0,102	0,100		
6	0,077	0,122	0,064	0,080	0,076	0,093	0,087	0,105		
7	0,112	0,073	0,057	0,083	0,097	0,128	0,102	0,078		
8	0,063	0,123	0,090	0,052	0,099	0,104	0,096	0,072		
9	0,105	0,097	0,049	0,113	0,080	0,087	0,102	0,072		
10	0,059	0,051	0,057	0,051	0,064	0,069	0,023	0,031		
11	0,120	0,099	0,114	0,075	0,123	0,092	0,087	0,106		
12	0,094	0,101	0,084	0,059	0,059	0,078	0,057	0,089		
R	0,071	0,089	0,066	0,081	0,064	0,083	0,090	0,124	$\bar{R} = 0,083$	
$\bar{x}$	0,089	0,097	0,076	0,083	0,089	0,090	0,084	0,089	$\bar{\bar{x}} = 0,087$	
$s^2$	5,2e-4	5,9e-4	3,6e-4	6,7e-4	3,6e-4	3,9e-4	6,3e-4	7,7e-4	$s^2_{total} = 5,694e-4$	

Tableau d'analyse de la variance

	SS	DF	MS	F
INTER	0,006887	7	0,0009839	1,83
INTRA	0,047202	88	0,0005364	
TOTALE	0,054090	95		

Il n'y a pas de différence significative entre les groupes ( $p>0,05$ ) car  $F(7;88; 0,05) = 2,13$

Critère de performance: erreur d'approche (m)    Tâche: 1    Moyenne des Distances 1 et 2

sujet	2 manettes x 2 ddl		1 manette x 4 ddl						mode	
	art.	cyl.	cartésien		cylindrique		tangential			
	linéaire		lin.	exp.	lin.	exp.	lin.	exp.		
	1	2	3	4	5	6	7	8	combinaison	
1	0,013	0,002	0,007	0,001	0,004	0,012	0,003	0,001		
2	0,032	0,010	0,004	0,019	0,033	0,008	0,014	0,007		
3	0,035	0,012	0,013	0,015	0,006	0,034	0,011	0,014		
4	0,034	0,013	0,034	0,000	0,002	0,013	0,011	0,026		
5	0,003	0,000	0,002	0,002	0,016	0,002	0,010	0,001		
6	0,049	0,016	0,018	0,005	0,003	0,014	0,015	0,004		
7	0,017	0,016	0,005	0,000	0,001	0,005	0,015	0,004		
8	0,004	0,003	0,018	0,001	0,001	0,001	0,002	0,003		
9	0,011	0,003	0,006	0,008	0,011	0,011	0,004	0,004		
10	0,004	0,000	0,003	0,000	0,001	0,001	0,001	0,000		
11	0,005	0,009	0,035	0,009	0,015	0,017	0,018	0,010		
12	0,059	0,017	0,002	0,004	0,011	0,020	0,023	0,015		
R	0,057	0,017	0,033	0,019	0,033	0,033	0,022	0,026	$\bar{R} = 0,030$	
$\bar{x}$	0,022	0,008	0,012	0,005	0,008	0,011	0,010	0,007	$\bar{\bar{x}} = 0,011$	
$s^2$	3,4e-4	3,9e-5	1,3e-4	3,5e-5	8,2e-5	8,0e-5	4,5e-5	5,4e-5	$s^2_{total} = 1,232e-4$	

Tableau d'analyse de la variance

	SS	DF	MS	F
INTER	0,002876	7	4,108e-4	4,09
INTRA	0,008830	88	1,003e-4	
TOTALE	0,011706	95		

Il y a une différence significative entre les groupes ( $p < 0,05$ ) car  $F(7;88; 0,05) = 2,13$

Critère de performance: erreur d'approche (m) Tâche: 2 Moyenne des Distances 1 et 2

sujet	2 manettes x 2 ddl		1 manette x 4 ddl							
	art.	cyl.	cartésien		cylindrique		tangential			
	linéaire		lin.	exp.	lin.	exp.	lin.	exp.		
	1	2	3	4	5	6	7	8	combinaison	
1	0,002	0,002	0,017	0,008	0,002	0,002	0,006	0,008		
2	0,001	0,001	0,001	0,000	0,002	0,013	0,003	0,005		
3	0,000	0,001	0,001	0,001	0,009	0,002	0,002	0,000		
4	0,009	0,009	0,002	0,002	0,002	0,005	0,007	0,009		
5	0,000	0,000	0,004	0,001	0,002	0,000	0,001	0,000		
6	0,000	0,000	0,001	0,000	0,002	0,000	0,001	0,000		
7	0,002	0,001	0,001	0,001	0,002	0,001	0,001	0,000		
8	0,001	0,003	0,003	0,003	0,005	0,008	0,007	0,008		
9	0,001	0,002	0,002	0,000	0,010	0,000	0,002	0,000		
10	0,003	0,001	0,001	0,000	0,002	0,000	0,001	0,000		
11	0,012	0,010	0,024	0,012	0,020	0,017	0,006	0,009		
12	0,019	0,010	0,018	0,032	0,004	0,008	0,002	0,003		
R	0,019	0,010	0,024	0,032	0,018	0,017	0,007	0,009	$\bar{R} = 0,017$	
$\bar{x}$	0,004	0,003	0,006	0,005	0,005	0,005	0,003	0,003	$\bar{\bar{x}} = 0,004$	
$s^2$	3,1e-5	1,5e-5	6,3e-5	8,0e-5	2,7e-5	3,1e-5	6,0e-6	1,4e-5	$s^2_{total} = 3,427e-5$	

Tableau d'analyse de la variance

	SS	DF	MS	F
INTER	0,000321	7	4,59e-5	1,38
INTRA	0,002934	88	3,33e-5	
TOTALE	0,003256	95		

Il n'y a pas de différence significative entre les groupes ( $p>0,05$ ) car  $F(7;88; 0,05) = 2,13$

Critère de performance: écart d'orientation ( $^{\circ}$ )    Tâche: 1    Moyenne des Distances 1 et 2

sujet	2 manettes x 2 ddl		1 manette x 4 ddl						mode fonction de gain combinaison	
	art.	cyl.	cartésien		cylindrique		tangential			
	linéaire		lin.	exp.	lin.	exp.	lin.	exp.		
	1	2	3	4	5	6	7	8		
1	12,6	4,2	6,1	1,2	10,9	10,3	9,7	11,3		
2	5,4	5,3	4,4	2,3	3,3	4,3	5,1	5,3		
3	6,1	5,3	4,7	6,0	5,7	5,3	5,6	6,4		
4	9,2	12,7	5,8	10,0	6,9	6,2	7,2	8,0		
5	4,9	3,6	4,9	4,5	2,8	3,2	6,5	4,8		
6	11,1	18,8	2,9	5,8	6,3	3,5	6,4	6,5		
7	2,5	3,7	3,8	1,6	3,7	3,1	4,1	5,3		
8	2,6	5,9	2,3	3,7	3,6	4,8	5,1	6,8		
9	9,5	11,9	4,1	4,8	5,4	3,9	5,8	7,8		
10	3,6	2,0	1,7	3,5	4,1	3,2	5,0	4,6		
11	7,5	8,8	8,1	6,1	12,7	5,9	4,0	5,2		
12	8,6	11,1	8,7	7,2	8,5	10,4	7,8	4,1		
R	10,1	16,8	7,0	8,8	10,0	7,3	5,7	7,3	$\bar{R} = 9,10$	
$\bar{x}$	6,9	7,7	4,8	4,7	6,1	5,3	6,0	6,3	$\bar{\bar{x}} = 5,99$	
$s^2$	10,0	22,5	4,1	5,7	9,1	6,0	2,5	3,7	$s^2_{total} = 8,92$	

Tableau d'analyse de la variance

	SS	DF	MS	F
INTER	146,94	7	20,991	2,64
INTRA	700,06	88	7,955	
TOTALE	847,00	95		

Il y a une différence significative entre les groupes ( $p < 0,05$ ) car  $F(7,88; 0,05) = 2,13$

Critère de performance: écart d'orientation ( $^{\circ}$ )      Tâche: 2      Moyenne des Distances 1 et 2

sujet	2 manettes x 2 ddl		1 manette x 4 ddl						mode fonction de gain combinaison	
	art.	cyl.	cartésien		cylindrique		tangentiel			
	linéaire		lin.	exp.	lin.	exp.	lin.	exp.		
	1	2	3	4	5	6	7	8		
1	5,6	4,5	1,9	0,2	3,6	5,6	4,4	9,9		
2	1,9	2,7	1,1	2,2	3,3	2,5	2,9	1,9		
3	4,8	3,2	1,0	2,5	6,3	3,9	4,8	4,8		
4	2,5	3,7	3,2	2,4	4,2	4,5	5,4	4,6		
5	3,4	7,3	1,8	0,9	2,2	2,1	3,0	3,4		
6	5,6	6,4	4,2	1,3	5,2	4,1	5,8	3,8		
7	4,0	5,6	0,5	0,3	3,9	2,2	4,1	4,2		
8	5,3	3,3	1,8	2,5	4,4	2,7	3,1	2,9		
9	4,0	5,7	0,2	1,3	3,7	4,0	3,6	5,0		
10	2,8	1,8	1,0	1,7	2,8	3,2	2,0	2,8		
11	2,3	6,7	2,5	1,5	5,1	2,7	3,8	4,2		
12	2,4	6,9	1,9	1,4	3,5	5,6	4,1	2,6		
R	3,7	5,6	4,0	2,3	4,1	3,5	3,8	8,0	$\bar{R} = 4,36$	
$\bar{x}$	3,7	4,8	1,7	1,5	4,0	3,6	3,9	4,1	$\bar{\bar{x}} = 3,42$	
$s^2$	1,7	3,2	1,2	0,6	1,1	1,4	1,1	3,8	$s^2_{total} = 2,96$	

Tableau d'analyse de la variance

	SS	DF	MS	F
INTER	127,23	7	18,18	10,36
INTRA	154,43	88	1,75	
TOTALE	281,66	95		

Il y a une différence significative entre les groupes ( $p < 0,05$ ) car  $F(7;88; 0,05) = 2,13$

**ANNEXE 6 - Données expérimentales sur l'apprentissage et la distance de la cible**

Critère de performance: temps de mouvement (s)

Tâche: 1

Distance: 1

sujet	nombre de pratiques								
	13	181	349	517	685	917	1149	2452	
1	17,18	8,22	7,15	6,82	6,86	5,88	7,24	7,51	
2	17,00	7,88	6,84	7,04	4,52	7,48	4,63	4,04	
3	19,71	6,64	8,60	8,21	9,02	8,27	6,18	8,47	
4	15,50	9,43	7,17	7,58	7,41	7,64	6,01	5,54	
5	10,10	7,81	6,79	4,91	6,97	8,03	7,50	3,23	
6	37,39	33,48	13,50	11,99	13,78	9,32	7,89	6,37	
7	18,90	13,17	9,72	9,19	10,60	7,73	9,77	9,12	
8	19,23	6,67	5,32	4,42	5,94	4,57	6,32	8,45	
9	20,38	14,02	13,26	12,11	6,15	11,13	10,66	7,28	
10	14,55	8,18	6,38	7,74	7,39	5,47	7,09	5,9	
11	11,52	9,06	7,49	9,08	7,12	5,08	6,81	5,14	
R	27,29	26,84	8,18	7,69	9,26	6,56	6,03	5,89	$\bar{R} = 12,22$
$\bar{x}$	18,31	11,32	8,38	8,10	7,80	7,33	7,28	6,46	$\bar{\bar{x}} = 9,37$
$s^2$	46,37	54,33	6,72	5,48	5,85	3,48	2,64	3,28	$s^2_{total} = 29,25$

Tableau d'analyse de la variance

	SS	DF	MS	F
INTER	1263,71	7	180,53	11,27
INTRA	1281,44	80	16,02	
TOTALE	2545,15	87		

Il y a une différence significative entre les groupes ( $p < 0,05$ ) car  $F(7;80; 0,05) = 2,20$

Critère de performance: temps de mouvement (s)

Tâche: 1

Distance: 2

sujet	nombre de pratiques								
	13	181	349	517	685	917	1149	2452	
1	26,92	10,60	8,03	7,02	10,22	9,95	7,53	7,56	
2	16,03	10,47	7,56	9,47	6,59	11,31	9,68	5,29	
3	21,19	10,04	13,37	9,80	8,45	10,92	8,89	9,70	
4	11,15	12,01	10,71	8,06	9,16	9,33	7,96	7,91	
5	15,79	9,42	6,96	5,25	7,48	6,82	7,38	5,37	
6	30,08	22,99	19,07	18,13	13,49	9,92	10,02	11,42	
7	32,17	15,82	10,66	11,91	9,93	9,22	9,95	8,98	
8	37,12	10,67	11,52	5,01	8,98	8,54	10,57	7,65	
9	43,04	15,71	14,84	10,39	9,59	11,09	9,65	9,37	
10	13,28	10,38	7,37	10,69	10,06	6,64	8,55	6,44	
11	15,15	9,03	10,02	8,32	7,57	7,11	6,10	6,39	
R	31,89	13,96	12,11	13,12	6,90	4,67	4,47	6,13	$\bar{R} = 11,66$
$\bar{x}$	23,81	12,47	10,92	9,46	9,23	9,17	8,75	7,83	$\bar{x} = 11,45$
$s^2$	104,0	15,89	12,45	11,85	3,08	2,64	1,74	3,34	$s^2_{total} = 42,95$

Tableau d'analyse de la variance

	SS	DF	MS	F
INTER	2186,88	7	312,41	16,13
INTRA	1549,68	80	19,37	
TOTALE	3736,56	87		

Il y a une différence significative entre les groupes ( $p < 0,05$ ) car  $F(7;80; 0,05) = 2,20$

Critère de performance: temps de mouvement (s)

Tâche: 2

Distance: 1

sujet	nombre de pratiques								
	13	181	349	517	685	917	1149	2452	
1	9,68	8,29	6,26	5,65	4,24	4,80	4,54	3,86	
2	10,92	5,62	5,13	4,49	4,01	4,59	2,59	2,41	
3	12,80	4,03	6,11	3,95	4,11	5,08	3,14	4,55	
4	12,70	7,01	7,50	6,94	5,44	5,55	3,55	4,86	
5	10,96	6,07	5,27	5,08	4,72	5,49	4,43	2,97	
6	11,04	8,38	6,42	6,55	5,93	5,43	5,09	4,01	
7	15,65	8,84	6,93	5,99	8,10	6,68	6,57	7,70	
8	11,32	4,14	4,94	3,40	3,65	3,76	3,08	3,71	
9	23,08	15,46	10,67	8,42	4,48	9,49	6,10	7,23	
10	8,27	4,89	5,93	4,98	4,60	5,01	5,02	2,98	
11	10,87	7,48	4,61	4,28	5,11	4,30	5,04	3,23	
R	14,81	11,43	6,06	5,02	4,45	5,73	3,98	5,29	$\bar{R} = 7,10$
$\bar{x}$	12,48	7,29	6,34	5,43	4,94	5,47	4,47	4,32	$\bar{x} = 6,34$
$s^2$	14,44	9,28	2,57	1,97	1,39	2,14	1,47	2,67	$s^2_{total} = 10,71$

Tableau d'analyse de la variance

	SS	DF	MS	F
INTER	572,3	7	81,76	18,20
INTRA	359,29	80	4,49	
TOTALE	931,59	87		

Il y a une différence significative entre les groupes ( $p < 0,05$ ) car  $F(7;80; 0,05) = 2,20$

Critère de performance: temps de mouvement (s)

Tâche: 2

Distance: 2

sujet	nombre de pratiques									
	13	181	349	517	685	917	1149	2452		
1	11,86	9,76	6,35	6,69	4,21	6,08	5,09	5,26		
2	15,24	7,60	4,42	5,78	5,21	4,89	4,62	4,86		
3	18,04	7,10	6,35	6,65	5,14	5,85	5,23	4,62		
4	8,93	8,03	8,76	10,89	7,38	7,08	5,96	5,45		
5	13,63	8,64	5,75	6,27	6,61	7,73	5,12	3,63		
6	16,69	14,07	10,61	7,38	8,68	8,22	4,88	4,62		
7	25,13	10,99	12,73	8,32	9,59	9,59	9,42	9,27		
8	20,50	8,14	5,38	4,97	5,01	4,80	4,82	5,66		
9	21,84	19,30	14,37	14,10	9,63	16,31	16,29	6,15		
10	9,56	8,04	8,58	6,63	7,11	5,85	7,11	4,65		
11	10,41	23,49	5,29	6,01	5,07	6,05	6,72	4,74		
R	16,20	16,39	9,95	9,13	5,42	11,51	11,67	5,64	$\bar{R} = 10,74$	
$\bar{x}$	15,62	11,38	8,05	7,61	6,69	7,50	6,84	5,36	$\bar{x} = 8,63$	
$s^2$	26,07	26,58	9,83	6,44	3,44	9,67	10,75	1,93	$s^2_{total} = 21,44$	

Tableau d'analyse de la variance

	SS	DF	MS	F
INTER	917,6	7	131,09	11,07
INTRA	947,27	80	11,84	
TOTALE	1864,87	87		

Il y a une différence significative entre les groupes ( $p < 0,05$ ) car  $F(7;80; 0,05) = 2,20$

Critère de performance: taux d'erreur (%)

Tâche: 1

Distance: 1

sujet	nombre de pratiques								
	13	181	349	517	685	917	1149	2452	
1	16,7	16,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
2	0,0	0,0	0,0	16,7	0,0	16,7	0,0	0,0	
3	16,7	0,0	0,0	16,7	0,0	0,0	0,0	0,0	
4	33,3	50,0	16,7	16,7	33,3	16,7	16,7	0,0	
5	33,3	16,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
6	50,0	50,0	33,3	16,7	0,0	16,7	0,0	0,0	
7	33,3	33,3	0,0	0,0	0,0	0,0	16,7	0,0	
8	16,7	16,7	0,0	0,0	16,7	33,3	0,0	0,0	
9	16,7	33,3	16,7	0,0	16,7	0,0	0,0	0,0	
10	0,0	0,0	0,0	16,7	16,7	16,7	0,0	0,0	
11	0,0	16,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
R	50,0	50,0	33,3	16,7	33,3	33,3	16,7	0,00	$\bar{R} = 29,16$
$\bar{x}$	19,7	21,2	6,1	7,6	7,6	9,1	3,0	0,00	$\bar{\bar{x}} = 9,29$
$s^2$	243,0	307,4	114,8	69,15	119,4	119,4	41,49	0,00	$s^2_{\text{total}} = 175,86$

Tableau d'analyse de la variance

	SS	DF	MS	F
INTER	5154,13	7	736,30	5,81
INTRA	10145,67	80	126,82	
TOTALE	15299,80	87		

Il y a une différence significative entre les groupes ( $p < 0,05$ ) car  $F(7;80; 0,05) = 2,20$

Critère de performance: taux d'erreur (%)

Tâche: 1

Distance: 2

sujet	nombre de pratiques								
	13	181	349	517	685	917	1149	2452	
1	50,0	0,0	16,7	0,0	16,7	0,0	0,0	0,0	
2	50,0	33,3	33,3	16,7	16,7	16,7	33,3	0,0	
3	16,7	0,0	16,7	16,7	0,0	0,0	0,0	0,0	
4	0,0	0,0	0,0	0,0	16,7	16,7	0,0	0,0	
5	0,0	16,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
6	16,7	0,0	33,3	50,0	16,7	33,3	33,3	0,0	
7	66,7	16,7	33,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
8	50,0	33,3	33,3	16,7	16,7	0,0	0,0	0,0	
9	0,0	0,0	0,0	0,0	16,7	16,7	0,0	0,0	
10	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
11	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
R	66,70	33,30	33,30	50,00	16,70	33,30	33,30	0,00	$\bar{R} = 33,33$
$\bar{x}$	22,74	9,09	15,15	9,10	9,11	7,58	6,05	0,00	$\bar{\bar{x}} = 9,85$
$s^2$	620,0	169,7	224,6	220,5	69,15	119,4	165,0	0,00	$s^2_{total} = 237,58$

Tableau d'analyse de la variance

	SS	DF	MS	F
INTER	4786,66	7	683,81	3,44
INTRA	15882,76	80	198,53	
TOTALE	20669,42	87		

Il y a une différence significative entre les groupes ( $p < 0,05$ ) car  $F(7;80; 0,05) = 2,20$

Critère de performance: taux d'erreur (%)

Tâche: 2

Distance: 1

sujet	nombre de pratiques								
	13	181	349	517	685	917	1149	2452	
1	16,7	0,0	0,0	0,0	16,7	33,3	16,7	0,0	
2	50,0	0,0	0,0	0,0	16,7	0,0	16,7	0,0	
3	16,7	0,0	0,0	16,7	0,0	0,0	0,0	0,0	
4	50,0	33,3	33,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
5	16,7	0,0	16,7	16,7	0,0	0,0	0,0	0,0	
6	16,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
8	33,3	33,3	0,0	0,0	0,0	16,7	0,0	0,0	
9	16,7	0,0	16,7	16,7	0,0	0,0	16,7	16,7	
10	0,0	0,0	16,7	0,0	0,0	0,0	0,0	16,7	
11	33,3	16,7	0,0	0,0	0,0	16,7	16,7	16,7	
R	50,00	33,30	33,30	16,70	16,70	33,30	16,70	16,70	$\bar{R} = 27,09$
$\bar{x}$	22,74	7,57	7,58	4,55	3,04	6,06	6,07	4,55	$\bar{\bar{x}} = 7,77$
$s^2$	266,0	169,6	119,4	55,32	41,49	114,8	64,54	55,32	$s^2_{total} = 144,92$

Tableau d'analyse de la variance

	SS	DF	MS	F
INTER	3743,87	7	534,84	4,83
INTRA	8864,03	80	110,80	
TOTALE	12607,90	87		

Il y a une différence significative entre les groupes ( $p < 0,05$ ) car  $F(7;80; 0,05) = 2,20$

Critère de performance: taux d'erreur (%)

Tâche: 2

Distance: 2

sujet	nombre de pratiques								
	13	181	349	517	685	917	1149	2452	
1	16,7	33,3	16,7	0,0	16,7	0,0	16,7	0,0	
2	0,0	0,0	0,0	16,7	16,7	16,7	0,0	0,0	
3	0,0	0,0	16,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
4	33,3	16,7	16,7	0,0	33,3	16,7	0,0	0,0	
5	0,0	33,3	0,0	0,0	0,0	16,7	0,0	0,0	
6	0,0	33,3	66,7	0,0	0,0	16,7	0,0	0,0	
7	33,3	50,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
8	66,7	33,3	16,7	16,7	0,0	0,0	0,0	0,0	
9	0,0	33,3	0,0	33,3	16,7	16,7	16,7	0,0	
10	0,0	16,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
11	16,7	16,7	0,0	16,7	0,0	0,0	0,0	16,7	
R	66,70	50,00	66,70	33,30	33,30	16,70	16,70	16,70	$\bar{R} = 37,51$
$\bar{x}$	15,15	24,24	12,14	7,58	7,58	7,59	3,04	1,52	$\bar{\bar{x}} = 9,85$
$s^2$	427,1	220,0	358,6	119,4	119,4	69,15	41,49	23,05	$s^2_{total} = 218,71$

Tableau d'analyse de la variance

	SS	DF	MS	F
INTER	5246,67	7	749,52	4,35
INTRA	13781,02	80	172,26	
TOTALE	19027,69	87		

Il y a une différence significative entre les groupes ( $p < 0,05$ ) car  $F(7;80; 0,05) = 2,20$

Critère de performance: écart longitudinal (m)

Tâche: 1

Distance: 1

sujet	nombre de pratiques								
	13	181	349	517	685	917	1149	2452	
1	0,181	0,577	0,375	0,120	0,155	0,130	0,108	0,078	
2	0,185	0,324	0,297	0,187	0,215	0,167	0,227	0,053	
3	0,149	0,178	0,178	0,166	0,142	0,071	0,134	0,021	
4	0,103	0,193	0,160	0,080	0,065	0,079	0,045	0,024	
5	0,126	0,085	0,154	0,117	0,114	0,105	0,045	0,061	
6	0,039	0,066	0,080	0,040	0,017	0,042	0,038	0,036	
7	0,033	0,113	0,070	0,113	0,070	0,051	0,051	0,014	
8	0,088	0,330	0,093	0,112	0,124	0,045	0,052	0,035	
9	0,139	0,224	0,121	0,090	0,254	0,144	0,097	0,017	
10	0,074	0,042	0,065	0,067	0,028	0,023	0,053	0,036	
11	0,070	0,064	0,078	0,122	0,123	0,111	0,148	0,094	
R	0,152	0,535	0,310	0,147	0,237	0,144	0,189	0,080	$\bar{R} = 0,224$
$\bar{x}$	0,108	0,200	0,152	0,110	0,119	0,088	0,091	0,043	$\bar{\bar{x}} = 0,114$
$s^2$	0,003	0,023	0,009	0,002	0,005	0,002	0,003	0,001	$s^2_{total} = 0,00782$

Tableau d'analyse de la variance

	SS	DF	MS	F
INTER	0,206259	7	0,02947	4,98
INTRA	0,473807	80	0,00592	
TOTALE	0,680066	87		

Il y a une différence significative entre les groupes ( $p < 0,05$ ) car  $F(7;80; 0,05) = 2,20$

Critère de performance: écart longitudinal (m)      Tâche: 1      Distance: 2

sujet	nombre de pratiques								
	13	181	349	517	685	917	1149	2452	
1	0,116	0,281	0,199	0,174	0,066	0,242	0,151	0,118	
2	0,050	0,170	0,194	0,261	0,216	0,184	0,150	0,147	
3	0,137	0,073	0,172	0,212	0,054	0,060	0,076	0,041	
4	0,095	0,091	0,106	0,086	0,053	0,095	0,128	0,062	
5	0,100	0,117	0,177	0,067	0,074	0,108	0,095	0,085	
6	0,075	0,065	0,069	0,190	0,042	0,057	0,046	0,051	
7	0,087	0,096	0,066	0,097	0,054	0,093	0,025	0,030	
8	0,129	0,225	0,177	0,148	0,095	0,033	0,069	0,058	
9	0,064	0,180	0,156	0,113	0,114	0,069	0,097	0,044	
10	0,083	0,111	0,046	0,081	0,047	0,066	0,051	0,041	
11	0,058	0,088	0,051	0,064	0,214	0,130	0,115	0,090	
R	0,087	0,216	0,153	0,197	0,174	0,209	0,126	0,117	$\bar{R} = 0,160$
$\bar{x}$	0,090	0,136	0,128	0,136	0,094	0,103	0,091	0,070	$\bar{\bar{x}} = 0,106$
$s^2$	0,001	0,004	0,003	0,004	0,004	0,003	0,002	0,001	$s^2_{total} = 0,00333$

Tableau d'analyse de la variance

	SS	DF	MS	F
INTER	0,065696	7	0,00939	3,35
INTRA	0,224436	80	0,00281	
TOTALE	0,290132	87		

Il y a une différence significative entre les groupes ( $p < 0,05$ ) car  $F(7;80; 0,05) = 2,20$

Critère de performance: écart longitudinal (m)

Tâche: 2

Distance: 1

sujet	nombre de pratiques								
	13	181	349	517	685	917	1149	2452	
1	0,261	0,240	0,241	0,203	0,205	0,130	0,109	0,031	
2	0,157	0,615	0,291	0,109	0,175	0,053	0,315	0,251	
3	0,557	0,211	0,127	0,252	0,118	0,070	0,066	0,115	
4	0,041	0,142	0,088	0,100	0,102	0,150	0,061	0,024	
5	0,063	0,112	0,085	0,138	0,087	0,137	0,072	0,093	
6	0,102	0,080	0,317	0,164	0,174	0,162	0,071	0,103	
7	0,087	0,211	0,044	0,107	0,081	0,060	0,063	0,054	
8	0,068	0,372	0,145	0,331	0,110	0,112	0,065	0,048	
9	0,125	0,145	0,284	0,143	0,331	0,042	0,071	0,073	
10	0,144	0,118	0,060	0,045	0,033	0,087	0,041	0,062	
11	0,083	0,063	0,062	0,094	0,088	0,199	0,012	0,057	
R	0,516	0,552	0,273	0,286	0,298	0,157	0,303	0,227	$\bar{R} = 0,327$
$\bar{x}$	0,153	0,210	0,159	0,153	0,137	0,109	0,086	0,083	$\bar{\bar{x}} = 0,136$
$s^2$	0,020	0,023	0,010	0,006	0,006	0,002	0,006	0,004	$s^2_{total} = 0,011$

Tableau d'analyse de la variance

	SS	DF	MS	F
INTER	0,204170	7	0,02917	3,05
INTRA	0,765315	80	0,00957	
TOTALE	0,969485	87		

Il y a une différence significative entre les groupes ( $p < 0,05$ ) car  $F(7;80; 0,05) = 2,20$

Critère de performance: écart longitudinal (m)

Tâche: 2

Distance: 2

sujet	nombre de pratiques								
	13	181	349	517	685	917	1149	2452	
1	0,187	0,248	0,173	0,152	0,089	0,130	0,137	0,050	
2	0,215	0,561	0,294	0,172	0,145	0,259	0,116	0,098	
3	0,185	0,232	0,182	0,137	0,087	0,049	0,053	0,026	
4	0,051	0,104	0,083	0,061	0,065	0,058	0,068	0,085	
5	0,085	0,078	0,081	0,100	0,062	0,070	0,121	0,126	
6	0,063	0,054	0,265	0,100	0,048	0,117	0,067	0,120	
7	0,076	0,193	0,086	0,045	0,046	0,060	0,036	0,014	
8	0,165	0,267	0,471	0,286	0,065	0,117	0,044	0,025	
9	0,113	0,119	0,106	0,067	0,199	0,087	0,054	0,085	
10	0,106	0,111	0,067	0,065	0,054	0,061	0,063	0,050	
11	0,072	0,064	0,080	0,109	0,088	0,143	0,077	0,085	
R	0,164	0,507	0,404	0,241	0,153	0,210	0,101	0,112	$\bar{R} = 0,237$
$\bar{x}$	0,120	0,185	0,172	0,118	0,086	0,105	0,076	0,069	$\bar{\bar{x}} = 0,116$
$s^2$	0,003	0,019	0,015	0,004	0,002	0,003	0,001	0,001	$s^2_{total} = 0,00772$

Tableau d'analyse de la variance

	SS	DF	MS	F
INTER	0,180090	7	0,02573	4,19
INTRA	0,491200	80	0,00614	
TOTALE	0,671291	87		

Il y a une différence significative entre les groupes ( $p < 0,05$ ) car  $F(7;80; 0,05) = 2,20$

Critère de performance: écart d'orientation (°)

Tâche: 1

Distance: 1

sujet	nombre de pratiques								
	13	181	349	517	685	917	1149	2452	
1	15,1	13,0	9,0	12,6	10,9	10,8	6,1	4,9	
2	9,3	12,9	7,0	13,9	10,1	5,4	8,9	4,3	
3	12,7	6,4	3,8	4,4	5,7	3,1	3,1	2,2	
4	7,2	10,6	4,5	10,6	4,1	3,2	2,4	1,3	
5	5,5	10,0	16,4	5,7	4,6	6,9	9,4	3,8	
6	13,3	13,0	6,1	4,6	9,6	3,9	1,9	2,3	
7	8,1	10,4	6,2	2,8	3,3	3,9	4,0	3	
8	4,1	3,5	1,8	2,4	4,8	3,2	2,8	2,2	
9	6,3	24,0	4,4	5,5	5,6	6,5	3,5	3,9	
10	4,7	5,5	5,1	2,4	1,6	3,5	3,3	1,1	
11	3,6	5,4	3,3	3,3	7,2	3,5	3,1	3,8	
R	11,5	20,5	14,6	11,5	9,3	7,7	7,5	3,8	$\bar{R} = 10,8$
$\bar{x}$	8,2	10,4	6,1	6,2	6,1	4,9	4,4	3,0	$\bar{\bar{x}} = 6,2$
$s^2$	14,29	28,87	13,94	15,91	8,08	5,14	6,05	1,42	$s^2_{total} = 16,340$

Tableau d'analyse de la variance

	SS	DF	MS	F
INTER	484,543	7	69,220	5,91
INTRA	937,056	80	11,713	
TOTALE	1421,599	87		

Il y a une différence significative entre les groupes ( $p < 0,05$ ) car  $F(7;80; 0,05) = 2,20$

Critère de performance: écart d'orientation (°)

Tâche: 1

Distance: 2

sujet	nombre de pratiques								
	13	181	349	517	685	917	1149	2452	
1	17,3	32,9	13,0	13,4	13,3	8,8	5,7	2,3	
2	11,8	10,8	10,4	5,8	5,0	6,3	9,3	4,7	
3	5,8	6,6	4,2	5,5	3,1	4,9	2,0	1	
4	7,8	6,2	8,9	4,9	3,5	2,6	4,6	2,1	
5	4,0	8,5	13,7	8,6	12,0	6,4	5,0	2,7	
6	6,5	5,6	4,5	12,6	5,0	4,7	3,8	1,3	
7	7,7	8,1	3,5	3,5	4,4	2,7	3,1	2,7	
8	10,6	6,5	2,6	4,4	4,1	3,1	4,0	1,3	
9	12,3	7,1	11,9	6,9	6,3	4,6	6,7	5,2	
10	6,4	2,6	3,2	4,1	2,7	2,5	2,0	2	
11	8,6	5,8	5,8	4,4	3,8	3,1	5,8	2,6	
R	13,3	30,3	11,1	9,9	10,6	6,3	7,3	4,2	$\bar{R} = 11,6$
$\bar{X}$	9,0	9,2	7,4	6,7	5,7	4,5	4,7	2,5	$\bar{\bar{X}} = 6,2$
$s^2$	12,88	60,13	16,33	10,58	11,57	3,67	4,17	1,62	$s^2_{total} = 19,729$

Tableau d'analyse de la variance

	SS	DF	MS	F
INTER	506,919	7	72,417	4,79
INTRA	1209,511	80	15,119	
TOTALE	1716,430	87		

Il y a une différence significative entre les groupes ( $p < 0,05$ ) car  $F(7;80; 0,05) = 2,20$

Critère de performance: écart d'orientation (°)      Tâche: 2      Distance: 1

sujet	nombre de pratiques								
	13	181	349	517	685	917	1149	2452	
1	3,5	7,6	5,4	3,6	4,1	7,2	7,4	3,9	
2	4,5	3,7	3,8	3,9	8,1	6,9	5,9	5,5	
3	3,1	4,2	1,7	2,3	2,1	3,5	2,1	4,2	
4	2,9	3,3	2,7	1,4	2,2	3,6	4,0	2,6	
5	3,3	1,6	2,9	4,1	1,9	3,1	1,3	4,9	
6	4,9	3,4	2,0	3,4	3,4	3,4	3,7	2,4	
7	3,9	2,5	3,9	5,0	2,9	1,7	1,8	1,7	
8	5,3	7,3	3,9	2,7	5,1	4,1	4,2	3,9	
9	2,5	1,7	2,0	4,5	4,7	1,4	4,8	4,8	
10	0,9	2,8	0,9	1,7	1,5	1,9	2,2	2,8	
11	4,9	2,7	2,6	2,6	2,2	4,8	4,6	2,6	
R	4,4	6,0	4,5	3,6	6,6	5,8	6,1	3,8	$\bar{R} = 5,1$
$\bar{x}$	3,6	3,7	2,9	3,2	3,5	3,8	3,8	3,6	$\bar{\bar{x}} = 3,5$
$s^2$	1,50	3,67	1,48	1,21	3,43	3,35	3,17	1,36	$s^2_{total} = 2,484$

Tableau d'analyse de la variance

	SS	DF	MS	F
INTER	24,420	7	3,489	1,46
INTRA	191,731	80	2,397	
TOTALE	216,151	87		

Il n'y a pas de différence significative entre les groupes ( $p>0,05$ ) car  $F(7;80; 0,05) = 2,20$

Critère de performance: écart d'orientation (°)

Tâche: 2

Distance: 2

sujet	nombre de pratiques								
	13	181	349	517	685	917	1149	2452	
1	2,2	2,5	4,3	2,1	5,1	3,3	3,6	3,9	
2	3,2	4,9	4,3	3,3	5,9	8,8	5,4	3,6	
3	2,8	3,2	3,7	3,8	2,9	3,9	3,9	2,6	
4	5,2	3,1	2,8	2,8	4,6	1,6	1,4	3,1	
5	2,1	3,1	2,6	4,2	2,6	3,8	4,2	3,6	
6	4,8	2,1	3,5	2,9	2,7	3,5	1,8	3,6	
7	4,8	4,4	5,6	3,3	1,9	3,7	4,1	2,5	
8	0,8	2,9	1,7	2,9	1,4	1,9	2,0	2,3	
9	2,6	1,0	3,1	1,7	1,9	1,5	1,9	2,1	
10	3,3	2,7	1,8	1,3	1,0	1,5	3,3	1,0	
11	4,1	1,9	3,4	7,2	3,1	3,4	2,7	2,5	
R	4,4	3,9	3,9	5,9	4,9	7,3	4,0	2,9	$\bar{R} = 4,7$
$\bar{X}$	3,3	2,9	3,3	3,2	3,0	3,4	3,1	2,8	$\bar{\bar{X}} = 3,1$
$s^2$	1,67	1,08	1,19	2,25	2,24	3,85	1,44	0,67	$s^2_{total} = 1,837$

Tableau d'analyse de la variance

	SS	DF	MS	F
INTER	15,911	7	2,273	1,26
INTRA	143,942	80	1,799	
TOTALE	159,853	87		

Il y n'y a pas de différence significative entre les groupes ( $p>0,05$ ) car  $F(7;80; 0,05) = 2,20$

**ANNEXE 7 - Données expérimentales sur le rapport de taille cible/pince**
**Critère de performance: temps de mouvement (s)**
**Nombre de pratiques = 13**

sujet	rapport de taille cible/pince				
	10%	25%	54%	75%	
1	12,08	11,42	15,04	27,52	
2	29,77	25,34	23,73	28,22	
3	36,87	56,97	41,33	50,34	
4	48,54	23,97	27,11	65,48	
5	32,82	22,05	26,88	18,64	
6	23,53	35,11	28,14	25,55	
7	30,02	25,98	30,71	24,04	
8	62,81	58,20	24,13	90,74	
9	12,06	10,58	13,57	11,93	
10	30,79	36,11	29,93	26,89	
11	26,61	44,98	30,85	43,86	
R	50,75	47,62	27,76	78,81	$\bar{R} = 51,24$
$\bar{x}$	31,45	31,88	26,49	37,56	$\bar{\bar{x}} = 31,85$
$s^2$	195,40	239,21	53,03	495,86	$s^2_{total} = 261,25$

**Tableau d'analyse de la variance**

	SS	DF	MS	F
INTER	1398,97	3	466,32	1,90
INTRA	9834,95	40	245,87	
TOTALE	11233,93	43		

**Il n'y a pas de différence significative entre les groupes ( $p>0,05$ ) car  $F(3;40; 0,05) = 2,84$**

Critère de performance: temps de mouvement (s)

Nombre de pratiques = 181

sujet	rapport de taille cible/pince				
	10%	25%	54%	75%	
1	9,86	8,32	11,74	12,18	
2	12,24	16,97	13,57	16,62	
3	19,16	17,98	21,82	N/D	
4	27,72	27,21	50,63	28,21	
5	7,63	7,16	10,39	9,16	
6	16,79	12,57	17,47	28,29	
7	17,83	16,65	15,84	19,38	
8	22,30	27,51	35,66	13,63	
9	8,29	7,31	8,82	10,19	
10	12,19	10,12	17,65	15,14	
11	17,75	14,62	13,30	16,98	
R	20,09	20,35	41,81	28,29	$\bar{R} = 27,64$
$\bar{x}$	15,61	15,13	19,72	16,98	$\bar{\bar{x}} = 16,86$
$s^2$	35,30	46,91	144,27	40,48	$s^2_{total} = 70,60$

Tableau d'analyse de la variance

	SS	DF	MS	F
INTER	366,46	3	122,15	1,83
INTRA	2669,53	40	66,74	
TOTALE	3035,99	43		

Il n'y a pas de différence significative entre les groupes ( $p>0,05$ ) car  $F(3;40, 0,05) = 2,84$

Critère de performance: temps de mouvement (s)

Nombre de pratiques = 349

sujet	rapport de taille cible/pince				
	10%	25%	54%	75%	
1	8,00	9,27	7,31	6,91	
2	11,78	10,96	11,54	15,00	
3	13,64	12,25	15,48	24,55	
4	16,95	18,26	19,73	N/D	
5	6,34	8,26	9,20	9,67	
6	12,25	18,48	21,66	21,47	
7	14,48	16,56	12,35	15,35	
8	16,06	24,51	10,24	15,86	
9	8,04	8,62	7,76	6,99	
10	16,72	14,05	11,56	14,48	
11	10,98	11,31	11,30	14,69	
R	10,61	16,25	14,35	24,55	$\bar{R} = 16,44$
$\bar{X}$	12,29	13,87	12,56	14,50	$\bar{\bar{X}} = 13,30$
$s^2$	12,37	23,53	19,43	28,98	$s^2_{total} = 21,71$

Tableau d'analyse de la variance

	SS	DF	MS	F
INTER	90,34	3	30,11	1,43
INTRA	843,01	40	21,08	
TOTALE	933,35	43		

Il n'y a pas de différence significative entre les groupes ( $p>0,05$ ) car  $F(3;40; 0,05) = 2,84$

Critère de performance: temps de mouvement (s)

Nombre de pratiques = 517

sujet	rapport de taille cible/pince				
	10%	25%	54%	75%	
1	5,58	6,67	6,03	6,24	
2	12,17	11,28	12,34	12,70	
3	11,90	12,07	14,43	16,11	
4	26,58	17,34	26,60	23,50	
5	7,95	7,84	9,34	8,24	
6	18,24	11,85	14,04	15,83	
7	8,49	12,86	12,09	12,65	
8	10,52	12,84	13,52	23,16	
9	6,25	7,84	6,00	8,29	
10	10,13	13,33	12,29	14,36	
11	10,85	11,06	12,03	17,23	
R	21,00	10,67	20,60	17,26	$\bar{R} = 17,38$
$\bar{x}$	11,70	11,36	12,61	14,39	$\bar{\bar{x}} = 12,52$
$s^2$	32,78	8,34	27,31	29,12	$s^2_{total} = 25,77$

Tableau d'analyse de la variance

	SS	DF	MS	F
INTER	132,62	3	44,21	1,81
INTRA	975,42	40	24,39	
TOTALE	1108,04	43		

Il n'y a pas de différence significative entre les groupes ( $p>0,05$ ) car  $F(3;40; 0,05) = 2,84$

Critère de performance: taux d'erreur (%)

Nombre de pratiques = 13

sujet	rapport de taille cible/pince				
	10%	25%	54%	75%	
1	0,0	0,0	16,7	50,0	
2	0,0	0,0	33,3	33,3	
3	0,0	0,0	33,3	33,3	
4	66,7	50,0	66,7	83,3	
5	0,0	16,7	0,0	33,3	
6	0,0	0,0	33,3	83,3	
7	50,0	33,3	16,7	50,0	
8	0,0	0,0	83,3	83,3	
9	0,0	0,0	0,0	33,3	
10	16,7	0,0	16,7	16,7	
11	16,7	16,7	0,0	16,7	
R	66,7	50,0	83,3	66,6	$\bar{R} = 66,65$
$\bar{x}$	13,6	10,6	27,3	47,0	$\bar{\bar{x}} = 24,62$
$s^2$	496,23	266,24	669,94	596,18	$s^2_{total} = 712,80$

Tableau d'analyse de la variance

	SS	DF	MS	F
INTER	10364,55	3	3454,85	6,81
INTRA	20285,79	40	507,14	
TOTALE	30650,33	43		

Il y a une différence significative entre les groupes ( $p < 0,05$ ) car  $F(3;40; 0,05) = 2,84$

Critère de performance: taux d'erreur (%)

Nombre de pratiques = 181

sujet	rapport de taille cible/pince				
	10%	25%	54%	75%	
1	0,0	0,0	0,0	16,7	
2	0,0	0,0	0,0	33,3	
3	0,0	0,0	16,7	100,0	
4	33,3	16,7	33,3	83,3	
5	0,0	33,3	33,3	66,7	
6	0,0	16,7	0,0	0,0	
7	0,0	0,0	33,3	16,7	
8	16,7	0,0	50,0	83,3	
9	0,0	0,0	0,0	0,0	
10	0,0	0,0	0,0	0,0	
11	16,7	16,7	0,0	50,0	
R	33,3	33,3	50,0	100,0	$\bar{R} = 54,15$
$\bar{x}$	6,1	7,6	15,1	40,9	$\bar{\bar{x}} = 17,43$
$s^2$	114,75	119,39	325,67	1280,39	$s^2_{total} = 655,71$

Tableau d'analyse de la variance

	SS	DF	MS	F
INTER	9793,82	3	3264,61	7,10
INTRA	18401,85	40	460,05	
TOTALE	28195,67	43		

Il y a une différence significative entre les groupes ( $p < 0,05$ ) car  $F(3;40; 0,05) = 2,84$

Critère de performance: taux d'erreur (%)

Nombre de pratiques = 349

sujet	rapport de taille cible/pince				
	10%	25%	54%	75%	
1	0,0	33,3	16,7	66,7	
2	0,0	0,0	0,0	16,7	
3	0,0	0,0	0,0	83,3	
4	0,0	0,0	66,7	100,0	
5	0,0	0,0	33,3	33,3	
6	0,0	16,7	0,0	0,0	
7	0,0	0,0	0,0	16,7	
8	0,0	0,0	50,0	50,0	
9	0,0	0,0	16,7	16,7	
10	0,0	0,0	16,7	0,0	
11	0,0	0,0	33,3	0,0	
R	0,0	33,3	66,7	100,0	$\bar{R} = 50,00$
$\bar{x}$	0,0	4,5	21,2	34,9	$\bar{\bar{x}} = 15,15$
$s^2$	0,00	105,50	459,18	1133,65	$s^2_{total} = 616,35$

Tableau d'analyse de la variance

	SS	DF	MS	F
INTER	9519,76	3	3173,25	7,47
INTRA	16983,30	40	424,58	
TOTALE	26503,06	43		

Il y a une différence significative entre les groupes ( $p<0,05$ ) car  $F(3;40; 0,05) = 2,84$

Critère de performance: taux d'erreur (%)

Nombre de pratiques = 517

sujet	rapport de taille cible/pince				
	10%	25%	54%	75%	
1	0,0	0,0	33,3	33,3	
2	0,0	0,0	0,0	0,0	
3	0,0	0,0	0,0	0,0	
4	0,0	0,0	50,0	83,3	
5	33,3	0,0	50,0	16,7	
6	0,0	0,0	0,0	0,0	
7	0,0	16,7	0,0	0,0	
8	0,0	0,0	16,7	66,7	
9	0,0	16,7	0,0	33,3	
10	0,0	0,0	0,0	0,0	
11	0,0	0,0	0,0	0,0	
R	33,3	16,7	50,0	83,3	$\bar{R} = 45,83$
$\bar{x}$	3,0	3,0	13,6	21,2	$\bar{\bar{x}} = 10,23$
$s^2$	91,64	41,49	394,76	812,40	$s^2_{total} = 394,01$

Tableau d'analyse de la variance

	SS	DF	MS	F
INTER	3539,76	3	1179,92	3,52
INTRA	13402,86	40	335,07	
TOTALE	16942,61	43		

Il y a une différence significative entre les groupes ( $p < 0,05$ ) car  $F(3;40; 0,05) = 2,84$

Critère de performance: écart longitudinal (m)

Nombre de pratiques = 13

sujet	rapport de taille cible/pince				
	10%	25%	54%	75%	
1	0,168	0,123	0,116	0,049	
2	0,071	0,080	0,011	0,015	
3	0,113	0,069	0,040	0,073	
4	0,349	0,242	0,233	0,011	
5	0,077	0,068	0,051	0,173	
6	0,069	0,118	0,072	0,101	
7	0,050	0,084	0,083	0,123	
8	0,062	0,207	0,104	0,098	
9	0,058	0,051	0,114	0,113	
10	0,147	0,109	0,071	0,092	
11	0,164	0,202	0,163	0,168	
R	0,299	0,191	0,222	0,162	$\bar{R} = 0,218$
$\bar{x}$	0,121	0,123	0,096	0,092	$\bar{\bar{x}} = 0,108$
$s^2$	0,00695	0,00383	0,00344	0,00260	$s^2_{total} = 0,00440$

Tableau d'analyse de la variance

	SS	DF	MS	F
INTER	0,02090	3	0,00697	1,66
INTRA	0,16813	40	0,00420	
TOTALE	0,18903	43		

Il n'y a pas de différence significative entre les groupes ( $p>0,05$ ) car  $F(3;40, 0,05) = 2,84$

Critère de performance: écart longitudinal (m)

Nombre de pratiques = 181

sujet	rapport de taille cible/pince				
	10%	25%	54%	75%	
1	0,183	0,132	0,044	0,096	
2	0,087	0,064	0,061	0,061	
3	0,082	0,069	0,083	N/D	
4	0,086	0,135	0,057	0,088	
5	0,107	0,119	0,125	0,113	
6	0,108	0,051	0,090	0,103	
7	0,493	0,494	0,072	0,079	
8	0,120	0,081	0,079	0,895	
9	0,091	0,094	0,110	0,143	
10	0,048	0,074	0,086	0,093	
11	0,133	0,097	0,115	0,124	
R	0,445	0,443	0,081	0,895	$\bar{R} = 0,466$
$\bar{x}$	0,140	0,128	0,084	0,180	$\bar{\bar{x}} = 0,133$
$s^2$	0,01354	0,01408	0,00058	0,05736	$s^2_{total} = 0,02169$

Tableau d'analyse de la variance

	SS	DF	MS	F
INTER	0,07713	3	0,02571	1,20
INTRA	0,85560	40	0,02139	
TOTALE	0,93273	43		

Il n'y a pas de différence significative entre les groupes ( $p>0,05$ ) car  $F(3;40; 0,05) = 2,84$

Critère de performance: écart longitudinal (m)

Nombre de pratiques = 349

sujet	rapport de taille cible/pince				
	10%	25%	54%	75%	
1	0,101	0,105	0,099	0,033	
2	0,112	0,062	0,030	0,033	
3	0,124	0,165	0,153	0,015	
4	0,127	0,097	0,120	N/D	
5	0,095	0,118	0,080	0,080	
6	0,078	0,055	0,051	0,067	
7	0,136	0,070	0,053	0,063	
8	0,070	0,091	0,148	0,065	
9	0,062	0,067	0,136	0,102	
10	0,056	0,043	0,112	0,037	
11	0,112	0,112	0,124	0,062	
R	0,080	0,122	0,123	0,102	$\bar{R} = 0,107$
$\bar{x}$	0,098	0,090	0,101	0,056	$\bar{\bar{x}} = 0,086$
$s^2$	0,00069	0,00112	0,00159	0,00061	$s^2_{total} = 0,00131$

Tableau d'analyse de la variance

	SS	DF	MS	F
INTER	0,01650	3	0,00550	5,49
INTRA	0,04004	40	0,00100	
TOTALE	0,05654	43		

Il y a une différence significative entre les groupes ( $p < 0,05$ ) car  $F(3;40; 0,05) = 2,84$

Critère de performance: écart longitudinal (m)

Nombre de pratiques = 517

sujet	rapport de taille cible/pince				
	10%	25%	54%	75%	
1	0,219	0,093	0,156	0,088	
2	0,056	0,051	0,020	0,049	
3	0,066	0,121	0,087	0,072	
4	0,086	0,134	0,035	0,111	
5	0,204	0,138	0,147	0,128	
6	0,060	0,062	0,052	0,069	
7	0,095	0,077	0,115	0,028	
8	0,096	0,110	0,062	0,164	
9	0,071	0,085	0,089	0,058	
10	0,064	0,106	0,047	0,052	
11	0,054	0,124	0,039	0,055	
R	0,165	0,087	0,136	0,136	$\bar{R} = 0,131$
$\bar{x}$	0,097	0,100	0,077	0,079	$\bar{\bar{x}} = 0,089$
$s^2$	0,00310	0,00076	0,00191	0,00147	$s^2_{total} = 0,00192$

Tableau d'analyse de la variance

	SS	DF	MS	F
INTER	0,00998	3	0,00333	1,84
INTRA	0,07240	40	0,00181	
TOTALE	0,08238	43		

Il n'y a pas de différence significative entre les groupes ( $p>0,05$ ) car  $F(3;40; 0,05) = 2,84$

Critère de performance: écart d'orientation (°)

Nombre de pratiques = 13

sujet	rapport de taille cible/pince				
	10%	25%	54%	75%	
1	5,1	8,8	4,9	4,3	
2	5,5	4,4	2,7	2,9	
3	7,0	2,8	6,7	13,9	
4	20,0	27,9	5,5	31,5	
5	6,2	10,2	9,4	7,4	
6	3,5	3,7	5,3	8,1	
7	5,7	6,4	2,6	3,8	
8	10,4	18,7	11,1	26,9	
9	3,9	6,1	3,9	5,6	
10	14,2	19,7	7,5	2,3	
11	12,6	28,1	10,7	3,1	
R	16,5	25,3	8,5	29,2	$\bar{R} = 19,88$
$\bar{x}$	8,6	12,4	6,4	10,0	$\bar{\bar{x}} = 9,34$
$s^2$	24,29	82,28	8,14	92,82	$s^2_{total} = 56,711$

Tableau d'analyse de la variance

	SS	DF	MS	F
INTER	363,27	3	121,09	2,33
INTRA	2075,31	40	51,88	
TOTALE	2438,58	43		

Il n'y a pas de différence significative entre les groupes ( $p>0,05$ ) car  $F(3;40; 0,05) = 2,84$

Critère de performance: écart d'orientation (°)

Nombre de pratiques = 181

sujet	rapport de taille cible/pince				
	10%	25%	54%	75%	
1	11,9	8,2	7,4	12,4	
2	1,7	4,3	4,7	5,6	
3	10,3	8,7	13,0	N/D	
4	10,0	4,4	9,3	5,9	
5	5,2	6,1	10,2	5,9	
6	7,3	1,9	6,2	5,5	
7	12,6	13,1	13,5	14,4	
8	7,4	5,5	9,1	2,2	
9	3,1	3,2	6,8	8,5	
10	3,6	4,3	4,0	4,7	
11	7,9	9,1	8,4	6,5	
R	10,9	11,2	9,5	14,4	$\bar{R} = 11,50$
$\bar{x}$	7,4	6,3	8,4	7,2	$\bar{\bar{x}} = 7,30$
$s^2$	12,09	9,52	8,47	12,11	$s^2_{total} = 11,115$

Tableau d'analyse de la variance

	SS	DF	MS	F
INTER	56,09	3	18,70	1,77
INTRA	421,86	40	10,55	
TOTALE	477,95	43		

Il n'y a pas de différence significative entre les groupes ( $p>0,05$ ) car  $F(3;40; 0,05) = 2,84$

Critère de performance: écart d'orientation (°)

Nombre de pratiques = 349

sujet	rapport de taille cible/pince			
	10%	25%	54%	75%
1	11,2	7,2	10,4	3,2
2	4,6	3,1	6,0	6,1
3	5,4	5,9	6,0	10,2
4	9,5	9,1	13,8	N/D
5	2,9	5,1	6,8	2,8
6	4,5	2,7	4,0	2,4
7	13,0	10,7	6,7	9,1
8	4,7	6,9	13,5	12,8
9	4,4	6,1	6,7	7,5
10	3,5	8,1	4,7	4,5
11	4,1	2,5	2,6	4,1
R	10,1	8,2	11,2	12,8
$\bar{x}$	6,2	6,1	7,4	6,3
$s^2$	10,57	6,41	12,21	11,19
				$s^2_{total} = 10,347$

Tableau d'analyse de la variance

	SS	DF	MS	F
INTER	41,05	3	13,68	1,36
INTRA	403,89	40	10,10	
TOTALE	444,94	43		

Il n'y a pas de différence significative entre les groupes ( $p>0,05$ ) car  $F(3;40; 0,05) = 2,84$

Critère de performance: écart d'orientation (°)

Nombre de pratiques = 517

sujet	rapport de taille cible/pince				
	10%	25%	54%	75%	
1	4,7	9,2	8,2	8,6	
2	2,7	2,2	1,5	1,6	
3	4,2	3,9	4,0	4,3	
4	9,4	6,7	19,8	13,4	
5	4,0	3,6	8,1	5,8	
6	4,0	3,7	3,0	5,5	
7	12,8	8,6	9,6	9,2	
8	8,4	2,5	3,1	8,9	
9	5,7	6,8	6,2	8,5	
10	6,6	5,6	2,9	5,2	
11	4,6	5,3	5,0	3,5	
R	10,1	7,0	18,3	11,8	$\bar{R} = 11,80$
$\bar{x}$	6,1	5,3	6,5	6,8	$\bar{\bar{x}} = 6,16$
$s^2$	8,15	5,02	23,85	9,93	$s^2_{total} = 12,054$

Tableau d'analyse de la variance

	SS	DF	MS	F
INTER	48,76	3	16,25	1,38
INTRA	469,57	40	11,74	
TOTALE	518,33	43		

Il n'y a pas de différence significative entre les groupes ( $p>0,05$ ) car  $F(3;40; 0,05) = 2,84$

**ANNEXE 8 - Données expérimentales sur le critère de distance de la cible**
**Critère de performance: temps de mouvement (s)      Tâche: 1      nombre de pratiques = 685**

sujet	Cible						
	2 (D1+t1 )	3 (D1+t2 )	4 (D1+t3 )	5 (D1+t4 )	1 (D1)	6 (D2)	
1	5,48	6,89	4,94	3,77	4,81	5,54	
2	9,61	11,37	7,41	9,21	7,66	10,69	
3	9,87	9,54	6,79	8,24	8,91	8,99	
4	7,17	13,31	8,94	7,60	6,42	11,82	
5	5,61	6,27	4,03	4,95	4,15	4,52	
6	13,41	15,42	16,49	10,50	11,57	17,3	
7	12,58	8,67	7,40	7,60	8,41	9,24	
8	8,99	9,70	7,77	5,89	7,38	9,64	
9	5,58	5,42	5,56	5,65	4,94	6,62	
10	10,04	9,21	6,62	10,03	7,84	10,05	
11	8,46	6,62	8,47	7,55	7,09	11,14	
R	7,93	10,00	12,46	6,73	7,42	12,78	$\bar{R} = 9,55$
$\bar{x}$	8,80	9,31	7,67	7,36	7,20	9,60	$\bar{\bar{x}} = 8,32$
$s^2$	6,66	8,70	9,75	4,10	4,08	10,88	$s^2_{total} = 8,266$

**Tableau d'analyse de la variance**

	SS	DF	MS	F
INTER	95,63	5	19,13	2,60
INTRA	441,64	60	7,36	
TOTALE	537,27	65		

Il y a une différence significative entre les groupes ( $p < 0,05$ ) car  $F(5;60; 0,05) = 2,37$

## ANNEXE 9 - Test de comparaisons multiples de Duncan

Le test de comparaisons multiples de Duncan [Duncan; 1955, Ott, 1984] permet d'effectuer toutes les paires de comparaison parmi  $t$  moyennes d'échantillons. Ce test est effectué de la manière suivante:

1) Mettre les moyennes des échantillons en ordre croissant.

2) Les moyennes de deux populations sont déclarées significativement différentes si la valeur absolue de la différence entre la moyenne de leurs échantillons dépasse

$$W_r = q_\alpha(r, v) \sqrt{\frac{S_w^2}{n}} \quad \text{où}$$

$n$  est le nombre d'observations de chaque moyenne d'échantillons

$S_w^2$  est la moyenne des carrés, telle qu'obtenue à partir du tableau ANOVA ( $MS_{\text{INTRA}}$ )

$v$  est le nombre de degrés de liberté de  $S_w^2$

$q_\alpha(r, v)$  est la valeur critique de l'étendue de Student

$\alpha$  est le niveau de confiance recherché (95 % dans notre cas)

$r$  est la distance de séparation des moyennes, incluant elle-mêmes

3) On représente les résultats sous forme de graphe linéaire, comme pour le test de Tukey (voir section 4.2.3.3).

Exemple

Données concernant le taux d'erreur de l'étude comparative pour la tâche 2 (voir annexe 5)

$n = 12$

$v = 88$

$S_w^2 = 224,74$

$r$	2	3	4	5	6	7	8
$q_\alpha(r, v)$	2,81	2,96	3,06	3,13	3,19	3,23	3,27
$W_r$	12,16	12,81	13,24	13,55	13,81	13,98	14,15

Interface	3	7	4	5	6	8	2	1
Moyenne ( $\bar{X}_i$ )	11,8	12,5	14,6	18,8	18,8	25,0	25,0	27,1

$$\bar{X}_1 - \bar{X}_3 = 15,3 > 14,15 \rightarrow \text{significatif}$$

$$\bar{X}_1 - \bar{X}_7 = 14,6 > 13,98 \rightarrow \text{significatif}$$

$$\bar{X}_1 - \bar{X}_4 = 12,5 < 13,81 \rightarrow \text{stop}$$

$$\bar{X}_2 - \bar{X}_3 = 13,2 < 13,98 \rightarrow \text{stop}$$

On constate donc qu'il y a une différence significative ( $p < 0,05$ ) entre l'interface 1 et les interfaces 3 et 7.

### ANNEXE 10 - Données expérimentales des essais sur le terrain

Deuxième série d'essais (interface conventionnelle vs palonnier et mode cylindrique)

Sujet (B)	Interface (A)		$\bar{B}$
	articulaire	cylindrique	
junior 3  ordre d'essai: 1. articulaire 2. cylindrique	387	447	
	319	402	
	373	393	
	363	398	
	322	359	358,3
	310	350	
	311	350	
	354	380	
	337	369	
	<u>279</u>	<u>362</u>	
	335,5	381,0	
junior 4  ordre d'essai: 1. articulaire 2. cylindrique	370	298	
	360	308	
	310	267	
	414	330	
	409	300	333,4
	339	301	
	349	279	
	448	320	
	348	303	
	<u>310</u>	<u>305</u>	
	365,7	301,1	
junior 5  ordre d'essai: 1. cylindrique 2. articulaire	399	340	
	386	313	
	375	290	
	309	294	
	307	273	318,0
	366	294	
	312	306	
	292	322	
	304	268	
	<u>324</u>	<u>286</u>	
	337,4	298,6	
$\bar{A}$	346,2	326,9	$\bar{X} = 336,55$
$s^2$	1670,372	2047,817	$S^2_{\text{total}} = 1922,286$

N.B. Comme le sujet junior 5 n'a pu compléter que 10 répliques, nous comparons ses résultats avec les 10 premières répliques des deux autres sujets. Le critère de performance utilisé est le temps d'exécution des saisies, mesuré en centiminutes.

Si on effectue l'analyse de la variance en considérant un modèle mixte où l'interface (A) a un effet fixe, tandis que le sujet (B) a un effet aléatoire, on obtient alors le tableau suivant:

Tableau d'analyse de la variance

source	SS	DF	MS	F
interface (A)	5587,35	1	5587,35	0,586
sujet (B)	17214,85	2	8607,43	
A x B	19060,35	2	9530,18	
erreur	71586,19	54	1325,67	
Total	113448,74	59		

N.B Dans ce cas, le test F est effectué sur le rapport  $MS_A / MS_{AB}$  [Ott, 1984; Beauchamp, 1989] et on a:

$$DF_A = a-1 \quad DF_B = b-1 \quad DF_{AB} = (a-1)(b-1) \quad DF_{\text{Erreur}} = r \quad DF_{\text{Total}} = abr - 1$$

où a = nombre d'interfaces, b = nombre de sujets, r = nombre de répliques par condition

$$SS_A = rb \sum \overline{A_i}^2 - n(\overline{\overline{X}})^2$$

$$SS_B = ra \sum \overline{B_i}^2 - n(\overline{\overline{X}})^2$$

$$SS_{AB} = a \sum \overline{AB_{ij}}^2 - SS_A - SS_B - n(\overline{\overline{X}})^2$$

$$SS_{\text{Total}} = \sum X_{ijk}^2 - n(\overline{\overline{X}})^2 = S_{\text{Total}}^2 df_{\text{Total}}$$

$$SS_{\text{Erreur}} = SS_{\text{Total}} - SS_A - SS_B - SS_{AB}$$

On constate donc qu'il n'y a pas de différence significative entre les interfaces ( $p>0,05$ ) car  $F(1;2;0,05) = 18,5$ .

Malgré tout, on constate quand même une réduction moyenne du temps de mouvement de 5,6 % en faveur de l'interface cylindrique.

Troisième série d'essais (interface conventionnelle vs manettes à 2 ddl et mode cylindrique)

Critère de performance: temps d'exécution des saisies (centiminutes)

Sujet	Interface (A)		$\bar{B}$
	articulaire	cylindrique	
novice 1	494	505	
ordre d'essai:	471	492	
	496	493	
1. cylindrique	444	542	
2. articulaire	398	500	
	411	527	
	447	471	
	378	473	
	385	457	
	410	473	
	444	474	
	361	509	
	397	510	
	374	491	
	<u>415</u>	<u>440</u>	
	421,7	490,5	
novice 2	679	391	
ordre d'essai:	630	382	
1. articulaire	673	326	
2. cylindrique	709	346	
	608	351	
	682	322	
	662	355	
	569	327	
	534	363	
	543	358	
	593	370	
	569	332	
	566	346	
	554	347	
	<u>494</u>	<u>303</u>	
	604,3	347,9	
$\bar{A}$	513,0	419,2	$\bar{X} = 466,10$
$s^2$	11535,724	5864,993	$s^2_{\text{total}} = 10789,786$

### Analyse de la variance simple

source	SS	DF	MS	F
INTER	131976,58	1	131976,57	15,17
INTRA	504620,79	58	8700,36	
TOTAL	636597,37	59		

où  $SS_{INTRA} = (rb - 1) \sum s_i^2$  et  $SS_{Total} = abrs_{Total}^2$

et  $DF_{INTER} = a-1$        $DF_{INTRA} = rb-1$        $DF_{Total} = abr - 1$

Il y a donc une différence significative entre les deux interfaces ( $p < 0,01$ ) car  $F(1;58;0,01) = 7,10$ . Le tout en faveur de l'interface cylindrique, avec une réduction du temps de 18,3%.

### Analyse de la variance à deux effets fixes

Soit l'effet dû à l'interface (A) et l'effet dû à l'ordre d'essai des interfaces (B), sachant que le sujet novice 1 a débuté avec l'interface en mode cylindrique, tandis que le sujet novice 2 a débuté avec l'interface conventionnelle en mode articulaire.

#### Tableau d'analyse de la variance

source	SS	ddl	MS	F
interface (A)	131976,60	1	131976,60	$MS_A/MS_E = 72,43$
ordre d'essai (B)	6036,05	1	6036,05	$MS_B/MS_E = 3,31$
A x B	396545,35	1	396545,35	$MS_{AB}/MS_E = 217,63$
erreur (E)	102039,37	56	1822,13	
Total	636597,37	59		

Comme  $F(1;56;0,05) = 4,02$ , on constate que l'interface (A) et l'interaction entre l'interface et l'ordre d'essai (AxB) ont un effet significatif (à un niveau de confiance supérieur à 99 %). On peut facilement constater que cet effet d'interaction est en fait dû à la pratique, puisque les sujets ont effectué les essais dans un ordre inverse l'un de l'autre. Finalement, on peut remarquer que l'effet de la pratique est encore plus marqué que celui dû à l'interface.

### ANNEXE 11 - Analyse de la moyenne multifactorielle

Dans notre cas, nous avons deux groupes de tailles inégales, constitués des interfaces 1 et 5 (groupe 1) et des interfaces 2,3,4,6 (groupe 2). La différence entre ces deux groupes est due au rapport max ( $q_i/V_{max,i}$ ), car dans le premier groupe ce rapport est de 1 s, alors qu'il est de 2 s dans le deuxième groupe.

Les limites ANOM [Wheeler, 1988] sont données par

$$X \pm H_{v,\alpha,k} \frac{1}{\sqrt{n_j}} \hat{\sigma} \quad \text{or,} \quad \alpha = 0,05$$

$$\bar{X}_1 = 7,28 \text{ s} \quad \bar{X}_2 = 8,85 \text{ s}$$

$$n_1 = 22 \quad n_2 = 66 \quad \text{d'où}$$

$$\bar{\bar{X}} = 8,32 \quad n = 66 \quad k = 2 \text{ groupes} \quad v = n - k = 64$$

$$s_1^2 = 4,293 \quad s_2^2 = 9,755$$

$$\sigma = \left[ \frac{1}{n-k} \sum_{j=1}^k (n_j - 1) s_j^2 \right]^{1/2} = 2,822$$

Les limites ANOM sont donc:

$$8,32 \pm 0,85 = 7,47 \text{ et } 9,17 \text{ pour } n_1$$

$$8,32 \pm 0,60 = 7,72 \text{ et } 8,92 \text{ pour } n_2$$

Dans le premier cas, les interfaces 1 et 5 sont en dessous des limites, alors que dans le deuxième cas les interfaces sont à l'intérieur des limites. Il y a donc une différence significative ( $p > 0,05$ ) entre les deux groupes.