



HAL
open science

Modélisation, analyse et simulation du mouvement d'entrée dans des véhicules automobiles à géométrie variable

Mohand Ouidir Ait El Menceur

► **To cite this version:**

Mohand Ouidir Ait El Menceur. Modélisation, analyse et simulation du mouvement d'entrée dans des véhicules automobiles à géométrie variable. Automatique / Robotique. Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, 2009. Français. NNT : 2009VALE0022 . tel-03032961

HAL Id: tel-03032961

<https://uphf.hal.science/tel-03032961v1>

Submitted on 1 Dec 2020

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

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

Thèse

présentée à

L'UNIVERSITÉ DE VALENCIENNES
ET DU HAINAUT-CAMBRÉSIS

pour l'obtention du

DOCTORAT

Spécialité

AUTOMATIQUE INDUSTRIELLE ET HUMAINE

par

Mohand Ouidir AIT EL MENCEUR

Ingénieur en Automatique de l'Université de Tizi Ouzou (Algérie)

Modélisation, Analyse et Simulation du Mouvement d'Entrée dans des Véhicules Automobiles à Géométrie Variable :

Application au mouvement d'entrée des personnes âgées et/ou ayant des déficiences motrices

Soutenue le 28 Septembre 2009 devant la commission d'examen :

Ronan BOULIC	Dr.Ing-HDR., VRLAB, EPF Lausanne, Suisse	Rapporteur
Noureddine MANAMANNI	Pr., CReSTIC, URC-A, Reims	Rapporteur
Wisama KHALIL	Pr., IRCCYN, Nantes	Examineur
André THEVENON	Pr., SMPR, CHRU de Lille	Examineur
Xuguang WANG	DR-HDR, INRETS, Lyon Bron	Examineur
Christine AZEVEDO-COSTE	CR, INRIA, Montpellier	Examineur
Philippe GORCE	Pr., HANDIBIO, UTV, Toulon	co-Directeur
François-Xavier LEPOUTRE	Pr., LAMIH, UVHC, Valenciennes	co-Directeur
Philippe PUDLO	MdC., LAMIH, UVHC, Valenciennes	co-Directeur

Thèse

présentée à

L'UNIVERSITÉ DE VALENCIENNES
ET DU HAINAUT-CAMBRÉSIS

pour l'obtention du

DOCTORAT

Spécialité

AUTOMATIQUE INDUSTRIELLE ET HUMAINE

par

Mohand Ouidir AIT EL MENCEUR

Ingénieur en Automatique de l'Université de Tizi Ouzou (Algérie)

Modélisation, Analyse et Simulation du Mouvement d'Entrée dans des Véhicules Automobiles à Géométrie Variable :

**Application au mouvement d'entrée des personnes âgées et/ou ayant des déficiences
motrices**

Soutenue le 28 Septembre 2009 devant la commission d'examen :

Ronan BOULIC	Dr.Ing-HDR., VRLAB, EPF Lausanne, Suisse	Rapporteur
Noureddine MANAMANNI	Pr., CReSTIC, URC-A, Reims	Rapporteur
Wisama KHALIL	Pr., IRCCYN, Nantes	Examinateur
André THEVENON	Pr., SMPR, CHRU de Lille	Examinateur
Xuguang WANG	DR-HDR, INRETS, Lyon Bron	Examinateur
Christine AZEVEDO-COSTE	CR, INRIA, Montpellier	Examinateur
Philippe GORCE	Pr., HANDIBIO, UTV, Toulon	co-Directeur
François-Xavier LEPOUTRE	Pr., LAMIH, UVHC, Valenciennes	co-Directeur
Philippe PUDLO	MdC., LAMIH, UVHC, Valenciennes	co-Directeur

Laboratoire d'Automatique, de Mécanique et d'Informatique industrielles et Humaines
UMR CNRS 8530

« Toute science crée une nouvelle ignorance »

Henri Michaux

REMERCIEMENTS

Ce travail a été réalisé au Laboratoire d'Automatique, de Mécanique et d'Informatique industrielles et Humaines (LAMIH) de l'Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis (UVHC) au sein de l'équipe de recherche Modélisation et Commande des Systèmes Industriels et Biomécaniques (MCSIB) dirigée par le professeur **Thierry- marie GUERRA**.

Ce travail a été financé entièrement par la **Région Nord - Pas de Calais**, pour qui je souhaite exprimer mon entière gratitude.

Je tiens à remercier mes directeurs de thèse **Pr. François-Xavier LEPOUTRE** du LAMIH de l'université de valenciennes et du Hainaut Cambrésis et **Pr. Philippe GORCE** du Laboratoire d'Ergonomie Sportive et Performance de l'Université du Sud Toulon-Var pour leur confiance qui ont mis en moi et en l'aboutissement de mon travail. Je souhaite également remercier **Philippe PUDLO** maître de conférence à l'UVHC pour son encadrement efficace et avec qui j'ai travaillé de plus près et pour la concrétisation de nos travaux par de nombreuses publications et conférences internationales.

Je profite de cette tribune pour remercier **Ronan BOULIC** Docteur Ingénieur et HDR du Laboratoire de Réalité Virtuelle (VRLAB) de l'EPFL de Lausanne et **Noureddine MANAMANNI** professeur au CReSTIC de l'Université de Reims et Champagne-Ardenne qui m'ont fait l'honneur d'accepter de lire, de commenter, et de rapporter ce travail.

Je remercie **Wisama Khalil**, Professeur des universités à l'École Centrale de Nantes pour m'avoir honoré par sa présidence de mon jury de thèse.

Je souhaite également remercier **Christine AZEVEDO-COSTE** Chargée de Recherche à l'INRIA de Montpellier, **André THEVENON** Professeur et chef du Service Médecine Physique et Réadaptation (SMPR) de l'hôpital Swynghedauw, CHRU de Lille et **Xuguang WANG** Directeur de Recherche et HDR de LBMC de l'INRETS Lyon Bron pour avoir accepté de participer à mon jury de thèse et examiner ce travail.

Bien sûr je témoigne ma profonde gratitude envers ma famille et à ma belle famille notamment envers ma mère qui n'a, certes, jamais met les pieds à l'école, mais elle m'a toujours soutenu et cru en mes capacités comme elle a longtemps partagé mes peines et mes joies. Un grand merci pour toi ayemma !! Je remercie également mon épouse et mon amour sacré **Hadjira** pour ses encouragements et soutien sans faille et qu'est venue exclusivement d'Algérie pour assister à ma soutenance de thèse ici en France et représenter ma famille ! Merci jojo !! Sans oublier mes sœurs « Samia », « Djazira », « Tounsia » et « Messaouda »

ainsi que leurs enfants, mes frères « Da Chaabane », « Da Salah », « Belaid », « Ali » et « Maamar » et leurs enfants et petits enfants, mes belles sœurs « Nassima » et « Narimane » et mes beaux frères « Mohammed » et « Imed » ainsi que mes beaux parents « Meghraoui » et « Kheïra ». Je souhaite rendre hommage à l'âme de mon oncle décidé peu après ma soutenance et à remercier la grande famille de ma mère ainsi que celle de mon père pour leur soutien et encouragement. Sans oublier mes amis d'ici en France et ceux que j'ai laissés dans l'autre rive de la Méditerranée.

Enfin je souhaite exprimer ma sympathie envers les « frères d'armes » de la salle 123 notamment Jean-François et Nicolas pour les nombreuses collaborations fructueuses ainsi que les échanges d'idées qui ont souvent aboutis à des avancées dans nos recherches ! Merci et bon courage les gars !!

SOMMAIRE

<i>Remerciements</i>	7
<i>SOMMAIRE</i>	9
<i>Liste des figures</i>	13
<i>Liste des tableaux</i>	16
<i>Introduction Générale</i>	21
<i>Chapitre 1 : REVUE DE LITTERATURE</i>	27
1.1 INTRODUCTION.....	27
1.2 LES MANNEQUINS NUMERIQUES	28
1.2.1 Introduction	28
1.2.2 Les mannequins numériques : une histoire.....	28
1.2.3 Caractéristiques des mannequins numériques	29
1.2.4 Les applications	30
1.2.5 Limites techniques ou fonctionnelles des mannequins numériques	31
1.2.6 Conclusion	32
1.3 ETUDE DU MOUVEMENT D'ACCESSIBILITE AUTOMOBILE.....	33
1.3.1 Introduction	33
1.3.2 Analyse du mouvement d'accessibilité.....	33
1.3.2.1 Les maquettes physiques.....	34
1.3.2.2 Protocoles et dispositifs de mesures.....	36
1.3.2.3 Quelques résultats issus des analyses.....	38
1.3.2.4. Conclusion	39
1.3.3 Identification de stratégies motrices*	40
1.3.4 Simulation du mouvement d'accessibilité	40
1.3.4.1 Les modèles biomécaniques pour étudier le mouvement d'accessibilité automobile	40
1.3.4.2 Simulation du mouvement d'accessibilité pour les personnes jeunes.....	42
1.3.4.3 Simulation du mouvement d'entrée-sortie de personnes à mobilité réduite	44
1.3.5 Etude de l'ergonomie du mouvement d'entrée-sortie.....	44
1.3.6 Conclusion.....	45
1.4 LES TECHNIQUES DE SIMULATION DES MOUVEMENTS HUMAINS.....	46
1.4.1 Introduction	46
1.4.2 Génération de mouvement à base de connaissances sur le mouvement	47
1.4.2.1 Les techniques à base de cinématique.....	47
1.4.2.2 Interpolation entre postures clés	51
1.4.3 Génération de mouvement à partir d'autres mouvements	51
1.4.3.1 Techniques utilisant plusieurs mouvements.....	52
1.4.3.2 Techniques à base de modifications d'un mouvement.....	55
1.4.4 Conclusion.....	56
1.5 CONSTRUCTION D'UNE BASE DE MOUVEMENTS POUR LA SIMULATION.....	57
1.5.1 Introduction	57
1.5.2 Outils de mesures de la cinématique du mouvement humain.....	57
1.5.2.1 Systèmes de capture du mouvement	57
1.5.3 Les erreurs de mesures des systèmes optoélectroniques.....	58
1.5.3.1 Les erreurs instrumentales	58
1.5.3.2 Les erreurs expérimentales	59
1.5.3.3 Correction des erreurs.....	59
1.5.4 Apport de la biomécanique	61
1.5.4.1 Modélisation biomécanique	61
1.5.4.2 Classification des modèles squelettiques	62
1.5.4.3 Description des modèles squelettiques	63
1.5.4.4 De l'être humain au modèle squelettique : les paramètres anatomiques.....	64
1.5.4.5 Détermination des centres articulaires pour les modèles squelettiques.....	67

1.5.4.6 Calcul des angles articulaires en biomécanique.....	68
1.5.5 Conclusion.....	70
1.6 QUANTIFICATION ET CLASSIFICATION DES MOUVEMENTS	71
1.6.1 Introduction	71
1.6.2 Classification des mouvements par observation.....	72
1.6.2.1 Etudes considérant des mouvements hors automobile.....	72
1.6.2.2 Etudes considérant des mouvements en rapport avec l'automobile.....	72
1.6.3 Classification quantitative des mouvements.....	73
1.6.3.1 Usage d'indices.....	73
1.6.3.2 Usage des algorithmes de classification.....	73
1.6.3.3 Usage d'une approche procédurale.....	74
1.6.4 Conclusion.....	75
1.7. CONCLUSION	75
<i>CHAPITRE 2 : METHODOLOGIE POUR SIMULER LE MOUVEMENT D'ENTREE DANS UN VEHICULE AUTOMOBILE</i>	<i>81</i>
2.1 INTRODUCTION.....	81
2.2 RESTRICTIONS ET HYPOTHESES DE L'ETUDE	81
2.2.1 Restrictions de l'étude	81
2.2.2 Hypothèses de l'étude.....	82
2.3 PRESENTATION DE LA DEMARCHE METHODOLOGIQUE.....	82
2.4 MODELISATION DE L'HUMANOÏDE DE SYNTHESE ET ANIMATION DU MOUVEMENT D'ENTREE	84
2.4.1 L'humanoïde.....	84
2.4.2 Description géométrique de l'humanoïde.....	85
2.4.2.1 Convention de Denavit et Hartenberg.....	85
2.4.2.2 Définition des paramètres de Denavit et Hartenberg	86
2.4.3 Modèle géométrique direct de l'humanoïde	87
2.4.4 Animation du mouvement d'entrée dans un véhicule automobile.....	88
2.4.5 Conclusion.....	90
2.5 ANALYSE DE DONNEES ET IDENTIFICATION DES STRATEGIES MOTRICES D'ENTREE DANS UN VEHICULE AUTOMOBILE	90
2.5.1 Calcul des indices 3BJCV du mouvement d'entrée.....	91
2.5.2 Détermination des stratégies principales du mouvement d'entrée.....	94
2.5.3 Détermination des angles articulaires pertinents du mouvement d'entrée.....	94
2.5.4 Détermination des sous stratégies du mouvement d'entrée	95
2.5.5 Conclusion.....	95
2.6 SIMULATEUR DU MOUVEMENT D'ENTREE DANS UN VEHICULE AUTOMOBILE.....	95
2.6.1 Travail préparatoire	96
2.6.1.1 Définition des zones d'influence	96
2.6.1.2 Définition des instants caractéristiques.....	97
2.6.1.3 Choix des points caractéristiques.....	99
2.6.1.4 Coordonnées des points caractéristiques retenues pour la simulation.....	100
2.6.2 Méthodologie de simulation du mouvement d'entrée dans un véhicule automobile	102
2.6.2.1 Calcul des coordonnées des points caractéristiques pour le véhicule de simulation.....	102
2.6.2.2 Simulation des trajectoires sur le véhicule de simulation	103
2.6.2.3 Génération des mouvements	105
2.6.3 Evaluation des mouvements simulés	109
2.6.4 Robustesse du simulateur développé.....	110
2.6.4 Conclusion.....	111
2.7 CONCLUSION	112
<i>CHAPITRE 3 : CONSTRUCTION DE LA BASE DE MOUVEMENTS</i>	<i>117</i>
3.1 INTRODUCTION.....	117
3.2 MESURE DU MOUVEMENT D'ENTREE DANS LE VEHICULE AUTOMOBILE.....	117
3.2.1 Dispositif expérimental.....	118

3.2.1.1 Véhicules dénudés	118
3.2.1.2 Système optoélectronique de capture du mouvement	119
3.2.2 Population.....	121
3.2.3 Protocole expérimental	122
3.2.4 Dessin de la carcasse des véhicules automobiles.....	128
3.2.5. Conclusion.....	129
3.3 TRAITEMENTS DE DONNEES	130
3.3.1 Estimation de la position du marqueur apposé au niveau de L5.....	130
3.3.2 Estimation des centres articulaires.....	131
3.3.3 Filtrage des données	131
3.3.4 Expression des données dans le repère lié au véhicule automobile	132
3.3.5 Calcul des angles articulaires en considérant le bassin comme racine	132
3.3.6 Calcul des angles articulaires en considérant le bassin comme effecteur	136
3.3.7 Adaptation des angles articulaires	137
3.3.7.1 Hypothèses.....	138
3.3.7.2 Adaptation du mouvement.....	138
3.3.7.3 Résultats de l'adaptation des angles articulaires	141
3.3.8 Découpage du mouvement d'entrée	145
3.3.9 Normalisation en temps et en amplitude des angles articulaires.....	147
3.3.10 Conclusion.....	147
3.4 CONCLUSION	148
CHAPITRE 4 : RESULTATS.....	151
4.1 INTRODUCTION.....	151
4.2 IDENTIFICATION DES STRATEGIES D'ENTREE	151
4.2.1 Identification des stratégies et sous stratégies d'entrée pour le « petit véhicule ».....	151
4.2.1.1 Etapes a et b : Détermination des stratégies « principales » du mouvement d'entrée.....	151
4.2.1.2 Etapes c et d : Détermination des sous stratégies du mouvement d'entrée	152
4.2.2 Identification des stratégies et sous stratégies d'entrée pour le « grand véhicule ».....	155
4.2.2.1 Etapes a et b : Détermination des stratégies principales du mouvement d'entrée.....	155
4.2.2.2 Etapes c et d : Détermination des sous stratégies du mouvement d'entrée	156
4.2.3 Description des stratégies identifiées.....	158
4.2.3.1 La sous stratégie LS (« Lateral Sliding »).....	159
4.2.3.2. La stratégie BM (« Backward Motion »).....	159
4.2.3.3 La stratégie MM (« Median Motion »)	160
4.2.3.4 La stratégie FM (« Forward Motion »)	161
4.2.3.5 La stratégie TB (« Trunk Backward »)	161
4.2.3.6 La stratégie TF (« Trunk Forward »)	162
4.2.4 Discussion des résultats	162
4.2.5 Conclusion.....	164
4.3 RESULTATS DE SIMULATION	164
4.3.1 Introduction	164
4.3.2 Simulation VéhExpérimental(p) → VéhSimulation(p)	165
4.3.2.1 Simulation des trajectoires des points « caractéristiques » sur le Véhicule Simulation.....	165
4.3.2.2 Simulation des angles articulaires et de l'orientation spatiale du bassin sur le Véhicule Simulation.....	167
4.3.2.3 Etude de la sous stratégie du mouvement simulé.....	169
4.3.3 Simulation VéhExpérimental (p) → VéhSimulation(g) à « 1 pied ».....	171
4.3.3.1 Simulation des trajectoires des points caractéristiques sur le Véhicule Simulation.....	171
4.3.3.2 Simulation des angles articulaires et de l'orientation du bassin sur le Véhicule Simulation ...	173
4.3.3.3 Etude de la sous stratégie du mouvement simulé.....	176
4.3.4 Simulation VéhExpérimental(p) → VéhCible(g) à « 2 pieds ».....	178
4.3.4.1 Simulation des trajectoires des points caractéristiques sur le Véhicule Simulation.....	178
4.3.4.2 Simulation des angles articulaires et de l'orientation du bassin sur le Véhicule Simulation ...	180
4.3.4.3 Etude de la sous stratégie du mouvement simulé.....	183
4.3.5 Simulation VéhExpérimental(p) → VéhSimulation(g)	184
4.3.5.1 Simulation des angles articulaires et orientation spatiale du bassin sur le Véhicule Simulation	184

4.3.6. Discussion.....	189
4.3.7. Robustesse du simulateur	190
4.3.6 Conclusion.....	191
4.4 CONCLUSION	192
<i>CHAPITRE 5 : PERSPECTIVES DE RECHERCHES.....</i>	<i>197</i>
5.1 INTRODUCTION.....	197
5.2 RETOUR SUR LES RESULTATS ET QUELQUES PERSPECTIVES.....	197
5.2.1 Identification des stratégies d'entrée dans un véhicule automobile.....	197
5.2.1.1 Contexte	197
5.2.1.2 Problématique	197
5.2.1.3 Perspective.....	198
5.2.2 Retour sur les résultats de simulation	198
5.2.2.1 Contexte	198
5.2.2.2 Problématique.....	198
5.2.2.3 Perspective.....	198
5.3 SIMULER LE MOUVEMENT D'ENTREE D'UNE PERSONNE DE TAILLE VARIABLE DANS UN VEHICULE DE GEOMETRIE VARIABLE.....	200
5.3.1 Contexte.....	200
5.3.2 Problématique.....	200
5.3.3 Perspective.....	200
5.4 CONSIDERER LA PHASE DE SORTIE.....	202
5.4.1 Contexte.....	202
5.4.2 Problématique.....	202
5.4.3 Perspective.....	202
5.5 MODIFICATION DE LA STRUCTURE DU MODELE.....	203
5.6 CONSTRUCTION DE DOMAINES DE PASSAGE PAR TYPE DE POPULATION	205
5.6.1 Contexte.....	205
5.6.2 Problématique.....	205
5.6.3 Perspective.....	206
5.7 PRISE EN COMPTE DE LA DYNAMIQUE	206
5.8 CONCLUSION	209
<i>CONCLUSION GENERALE.....</i>	<i>213</i>
<i>BIBLIOGRAPHIE PERSONNELLE</i>	<i>219</i>
<i>BIBLIOGRAPHIE.....</i>	<i>223</i>
<i>GLOSSAIRE.....</i>	<i>243</i>
<i>ANNEXE A.1.1 Cinq mannequins numeriques.....</i>	<i>247</i>
<i>ANNEXE A.2.1 Matrice de transformation homogène.....</i>	<i>255</i>
<i>ANNEXE A.2.2 rappelés sur AFCM + CHA.....</i>	<i>256</i>
<i>ANNEXE A.2.3. Calcul de contraintes articulaires pour le problème de cinématique inverse</i>	<i>266</i>
<i>ANNEXE A.3.1 Caractéristiques des sujets retenus dans la présente étude.....</i>	<i>279</i>
<i>ANNEXE A.3.2 Mesures anthropométriques</i>	<i>280</i>
<i>ANNEXE A.3.3 La méthode de sphere fitting.....</i>	<i>283</i>
<i>ANNEXE A.3.4 Les stratégies issues de l'observation.....</i>	<i>285</i>
<i>ANNEXE A.4.1 Les stratégies issues de la classification automatique.....</i>	<i>286</i>
<i>ANNEXE A.4.2 Limites articulaires retenues en fonction des sous-stratégies.....</i>	<i>287</i>
<i>ANNEXE A.4.3 Simulation.....</i>	<i>289</i>

LISTE DES FIGURES

Figure 1 1. Les mannequins numériques SAMMIE (1965) et SANTOS (2003).....	29
Figure 1 2. Les mannequins numériques SAFEWORK et RAMSIS.....	30
Figure 1 3. Conformateur représentant le poste de conduite d'une Citroën Xantia, utilisé par Lempereur (Lempereur, 2006) dans l'étude du mouvement d'entrée.....	34
Figure 1 4. Les quatre véhicules utilisés pour étudier le mouvement d'accessibilité des personnes âgées et/ou handicapées dans le cadre du projet HANDIMAN (Ait El Menceur et al., 2008a).....	35
Figure 1 5. L'habitacle paramétrable VEMO de la firme BMW (Rigel et al., 2003).....	36
Figure 1 6. Les 8 postures considérées par Kawachi et al. (Kawachi et al., 2005) pour décomposer le mouvement d'entrée.....	39
Figure 1 7. Modèle géométrique et cinématique proposé par Lempereur (Lempereur, 2006) pour simuler le mouvement d'entrée dans un véhicule automobile.....	42
Figure 1 8. Visualisation d'une posture d'entrée d'une personne âgée ayant deux prothèses de hanches et une prothèse au genou gauche par le logiciel MAN3D (Wang, 2008).....	44
Figure 1 9. Exemple de mélange de mouvements de marche avec un mouvement de saut (Rose et al., 1996).....	53
Figure 1 10. Mise en évidence de la nécessité d'adapter le mouvement en fonction des paramètres du nouveau squelette (Gleicher, 1998).....	54
Figure 1 11. Classification des modèles utilisés en biomécanique (Pudlo, 1999).....	61
Figure 1 12. Modèles plans chaînes ouvertes, arborescents et tridimensionnels (Gorce, 2000).....	63
Figure 1 13. Colonne vertébrale (Kapandji, 1975).....	64
Figure 1 14. Représentation du bassin (pelvis).....	66
Figure 1 15. Centre articulaire du genou et de la cheville (Lempereur, 2006).....	68
Figure 2 1. Schéma de principe de la démarche méthodologique proposée pour prédire le mouvement d'entrée dans un véhicule automobile de géométrie variable.....	83
Figure 2 2. Modèle tridimensionnel poly-articulé représentatif du corps humain ; ce dernier est constitué de 3 chaînes cinématiques ouvertes simples, la chaîne rassemblant le tronc et la tête, les chaînes représentant le membre inférieur droit et gauche.....	85
Figure 2 3. Chaîne cinématique simple ouverte.....	85
Figure 2 4. Paramètres de Denavit et Hartenberg (1955).....	85
Figure 2 5. Démarche proposée pour identifier les stratégies motrices pour entrer dans un véhicule automobile.....	91
Figure 2 6. Définition des repères associés aux zones d'influence.....	96
Figure 2 7. Les sept instants caractéristiques de la stratégie d'entrée à un pied (la sous stratégie représentée ici correspond à la stratégie LS, Cf. Chapitre 1).....	98
Figure 2 8. Les quatre instants caractéristiques de la stratégie d'entrée à deux pieds.....	99
Figure 2 9. Les 7 points caractéristiques considérés dans l'étude.....	100
Figure 2 10. Coordonnées caractéristiques selon l'axe Z du «bout du pied droit» repérés pour la sous stratégie à un pied LS.....	100
Figure 2 11. Déformation de la trajectoire source pour la faire passer par les points caractéristiques cibles.....	103
Figure 2 12. Première adaptation pour satisfaire le point final.....	104
Figure 2 13. Deuxième adaptation pour satisfaire le point initial.....	104
Figure 2 14. Définition des repères sur le volant et le siège.....	109
Figure 2 15. Algorithme de test de la robustesse du simulateur.....	111
Figure 3 1. Les deux véhicules utilisés dans l'étude, à gauche le « petit véhicule », à droite le « grand véhicule ». Pour chaque véhicule les caractéristiques principales (ex. la position du siège, le volant, le bavolet*) sont maintenues.....	118
Figure 3 2. Illustration des caractéristiques géométriques introduites au tableau 3.1.....	119
Figure 3 3. Outils de calibration du système Vicon®.....	120
Figure 3 4. Disposition des caméras autour du véhicule.....	121

Figure 3 5. Répartition de la population expérimentée.	122
Figure 3 6. Déroulement d'une expérimentation au LAMIH.	124
Figure 3 7. Position des marqueurs sur le sujet (outil graphique : Bernhard Ungerer).	125
Figure 3 8. Capture en position « statique » assis à l'intérieur de la grille de calibration.	126
Figure 3 9. Réalisation des mouvements de circumduction de la jambe.	127
Figure 3 10. Posture adoptée avant d'entrée dans le véhicule.	128
Figure 3 11. Position des marqueurs sur chaque véhicule.	128
Figure 3 12. Repère lié au pubis (Lempereur, 2006).	130
Figure 3 13. Définition des différents repères associés aux segments corporels (calcul des angles articulaires en prenant le bassin comme base).	133
Figure 3 14. Définition des différents repères associés aux segments corporels (calcul d'angles articulaires en prenant le bassin comme effecteur)	137
Figure 3 15. Trajectoires mesurées par le système optoélectronique et reconstruites à l'aide des angles calculées, des pieds, chevilles, genoux, L5, C7 et le vertex pour un sujet de sexe féminin, âgée de 72 ans, n'ayant pas de déficience motrice et adoptant la stratégie MM (Cf. Chapitre 4) lors de son mouvement d'entrée.	142
Figure 3 16. Trajectoires mesurées, reconstruites et adaptées par notre procédure, des pieds, chevilles, genoux, L5, C7 et le vertex pour un sujet de sexe féminin, âgée de 72 ans, n'ayant pas de déficience motrice et adoptant la stratégie MM (Cf. Chapitre 4) lors de son mouvement d'entrée.	143
Figure 3 17. Zoom sur une partie de la trajectoire de la cheville droite, mesurée, reconstruite à partir des angles adaptés par la procédure de Lempereur et al. (Lempereur et al., 2003), et par la procédure d'adaptation proposée, pour un sujet de sexe féminin, âgée de 72 ans, n'ayant pas de déficience motrice et adoptant la stratégie MM (Cf. Chapitre 4) lors de son mouvement d'entrée.	144
Figure 3 18. Découpage du mouvement d'entrée en trois sous phases : phase d'ouverture de la portière (1), phase d'adaptation du mouvement d'entrée (2) et la phase de positionnement sur le siège (3)	145
Figure 3 19. Illustration des instants de début et de fin de la phase d'adaptation du mouvement d'entrée sur les trajectoires du pied droit et gauche.	146
Figure 3 20. Postures adoptées lors du début et de fin de la phase d'adaptation du mouvement d'entrée dans un véhicule automobile.	147
Figure 4 1. Dendrogramme de la CHA réalisée sur les indices 3BJCV calculés pour les 33 sujets entrant dans le « petit véhicule ».	152
Figure 4 2. Dendrogramme de la CHA réalisée sur les angles articulaires pour les sujets pratiquant la première grande stratégie, la stratégie d'entrée à 1 pied, dans le « petit véhicule ».	154
Figure 4 3. Dendrogramme de la CHA réalisée sur les angles articulaires pour les sujets pratiquant la deuxième grande stratégie, la stratégie d'entrée à 2 pieds, dans le « petit véhicule ».	155
Figure 4 4. Dendrogramme de la CHA réalisée sur les indices 3BJCV calculés pour les 37 sujets entrant dans le « grand véhicule ».	155
Figure 4 5. Dendrogramme de la CHA réalisée sur les angles articulaires pour les sujets pratiquant la première grande stratégie, la stratégie d'entrée à 1 pied, dans le « grand véhicule ».	158
Figure 4 6. Dendrogramme de la CHA réalisée sur les angles articulaires pour les sujets pratiquant la deuxième stratégie, la stratégie d'entrée à 2 pieds, dans le « grand véhicule ».	158
Figure 4 7. La stratégie LS (« lateral sliding »).	159
Figure 4 8. La stratégie BM (« backward motion »).	160
Figure 4 9. La stratégie MM (Median Motion).	160
Figure 4 10. La stratégie FM (Forward motion) MA (Mouvement en Avant).	161
Figure 4 11. La stratégie TB(Trunk backward)).	162
Figure 4 12. La stratégie TF (« Trunk Forward »).	162
Figure 4 13. Trajectoires mesurées et simulées des points caractéristiques pour le sujet 12 réalisant la sous stratégie LS sur le « petit véhicule » exprimées dans le repère lié au laboratoire.	166
Figure 4 14. Orientation spatiale du bassin et angles articulaires adaptés sur le « petit véhicule » (Véhicule Expérimental) et simulés sur le « petit véhicule » (Véhicule Simulation) pour le sujet 12 réalisant la sous stratégie LS.	168

Figure 4 15. Postures simulées et postures mesurées sur le « petit véhicule » pour le sujet 12 réalisant la sous stratégie LS (cas où le Véhicule Simulation est le Véhicule Expérimental).....	169
Figure 4 16. Trajectoires des points caractéristiques mesurées et simulées sur le « grand véhicule » pour le sujet 12 réalisant la sous stratégie LS exprimées dans le repère lié au laboratoire.	172
Figure 4 17. Orientation spatiale du bassin et angles articulaires adaptés et simulés sur le Véhicule Simulation (le « grand véhicule ») pour le sujet 12 réalisant la sous stratégie LS.	173
Figure 4 18. Postures simulées et postures mesurées sur le « grand véhicule » pour le sujet 12 réalisant la sous stratégie LS.	176
Figure 4 19. Trajectoires mesurées et simulées sur le « grand véhicule » des points caractéristiques pour le sujet 16 réalisant la sous stratégie TB exprimées dans le repère lié au laboratoire.....	179
Figure 4 20. Orientation spatiale du bassin et angles articulaires adaptés et simulés sur le Véhicule Simulation (le « grand véhicule ») pour le sujet 16 réalisant la sous stratégie TB.	181
Figure 4 21. Postures simulées et postures mesurées sur le « grand véhicule » pour le sujet 16 réalisant la sous stratégie TB.	183
Figure 4 22. Orientation spatiale du bassin et angles articulaires et orientation spatiale adaptés sur Véhicule Expérimental (le « petit véhicule ») et simulés sur le Véhicule Simulation (le « grand véhicule ») pour le sujet 19 réalisant la sous stratégie MM.	186
Figure 4 23. Trajectoires des points caractéristiques reconstruites (à l'aide du MGD) et simulés dans le Véhicule Simulation (le « grand véhicule ») pour le sujet 19 réalisant la sous stratégie MM exprimées dans le repère lié au laboratoire.....	187
Figure 4 24. Postures simulées sur le Véhicule Simulation (le « grand véhicule ») pour le sujet 19 réalisant la sous stratégie MM.....	189
Figure 4 25. Collision de la tête de l'humanoïde et du brancard pour la sous stratégie LS pour un siège de hauteur égale à 680 mm (du sol).....	191
Figure 5 1. Trajectoire du pied suivant Z d'un sujet âgé de 75 ans, mesurant 1.95m, pesant 90kg, muni d'une prothèse de hanche droite et ayant adopté la sous stratégie LS (« Lateral Sliding »), sur le « petit véhicule » et sur « le grand véhicule ».....	200
Figure 5 2. La démarche proposée pour simuler le mouvement d'entrée d'une personne de taille variable dans un véhicule à géométrie variable.....	201
Figure 5 3. Domaine de passage de la tête lors du mouvement de sortie (outil graphique RAMSIS).....	205
Figure 5 4. Contrôleur PID (Ménardais, 2003).....	208

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 1. Exemples de populations impliquées dans les études du mouvement d'accessibilité automobile.....	37
Tableau 1 2. Exemples de dispositifs expérimentaux utilisés dans la mesure du mouvement d'accessibilité automobile.....	38
Tableau 1 3. Découpage du mouvement d'accessibilité en fonction de l'interaction avec le véhicule et en considérant des postures clés.....	38
Tableau 1 4. Exemples d'indices et de profils associés au mouvement d'accessibilité définis dans la littérature.....	39
Tableau 1 5. Stratégies motrices d'accessibilité automobile du corps entier et d'une partie du corps rapportées dans la littérature.....	41
Tableau 1 6. Synthèse d'études abordant la simulation du mouvement d'accessibilité pour les personnes jeunes.....	43
Tableau 1 7. Principaux résultats des études ergonomiques du mouvement d'accessibilité.....	45
Tableau 1 8. Quelques études proposant de remédier au problème de la perte de marqueurs.....	59
Tableau 1 9. Synthèse d'études proposant de remédier au problème de glissements de peau par optimisation.....	61
Tableau 1 10. Amplitudes globales en flexion extension, rotation et d'inflexion latérale du rachis (Pradon, 2004).....	65
Tableau 2 1. Paramètres de Denavit et Hartenberg (Denavit et Hartenberg, 1955) de la chaîne « Membre Inférieur ».....	86
Tableau 2 2. Paramètres de Denavit et Hartenberg (Denavit et Hartenberg, 1955) de la chaîne « Tronc + Tête ».....	87
Tableau 2 3. Repères dans lesquels les points caractéristiques sont exprimés pour la stratégie à 1 pied.....	101
Tableau 2 4. Repères dans lesquels les points caractéristiques sont exprimés pour la stratégie à 2 pieds.....	101
Tableau 3 1. Principales caractéristiques géométriques (mm) des 2 véhicules retenus.....	119
Tableau 3 2. Synthèse des sujets ayant pris part aux expérimentations.....	122
Tableau 3 3. Synthèse des sujets munis d'une prothèse ayant pris part aux expérimentations.....	122
Tableau 3 4. Label et position anatomique des 53 marqueurs.....	126
Tableau 3 5. Label des 33 marqueurs apposés sur chaque véhicule.....	129
Tableau 3 6. Définition du repère lié au bassin (la base).....	133
Tableau 3 7. Définition du repère lié au tronc.....	133
Tableau 3 8. Définition du repère lié à la tête.....	134
Tableau 3 9. Définition du repère lié à la cuisse droite.....	134
Tableau 3 10. Définition du repère lié à la jambe droite.....	134
Tableau 3 11. Définition du repère lié au pied droit.....	135
Tableau 3 12. Valeur de tolérance pour chaque articulation des chaînes « Membres Inférieurs » (Lempereur, 2006).....	139
Tableau 3 13. Valeur de tolérance pour chaque articulation de la chaîne rassemblant le « Tronc + Tête ».....	140
Tableau 3 14. Variation maximale de chaque angle articulaire des chaînes « Membre Inférieur » pour un sujet de sexe féminin, âgée de 72 ans, n'ayant pas de déficience motrice et adoptant la stratégie MM (Cf. Chapitre 4) lors de son mouvement d'entrée.....	140
Tableau 3 15. Variation maximale de chaque angle articulaire de la chaîne « Tronc + Tête » pour un sujet de sexe féminin, âgée de 72 ans, n'ayant pas de déficience motrice et adoptant la stratégie MM (Cf. Chapitre 4) lors de son mouvement d'entrée.....	141
Tableau 3 16. RMS (en mm) calculées entre les trajectoires mesurées, reconstruites à partir des angles adaptés par la méthode de Lempereur et al. (Lempereur et al., 2003) et par notre méthode d'adaptation.....	144
Tableau 4 1. Contributions relatives des angles articulaires définissant l'orientation spatiale de la chaîne « Membre Inférieur » droit dans la constitution des 2 axes du premier plan factoriel pour le « petit véhicule ».....	153
Tableau 4 2. Contributions relatives des angles articulaires définissant l'orientation spatiale de la chaîne « Membre Inférieur » gauche dans la constitution des 2 axes du premier plan factoriel pour le « petit véhicule ».....	153
Tableau 4 3. Contributions relatives des angles articulaires définissant l'orientation spatiale de la chaîne « Tronc + Tête » dans la constitution des 2 axes du premier plan factoriel pour le « petit véhicule ».....	153
Tableau 4 4. Contributions relatives des angles articulaires définissant l'orientation spatiale de la chaîne « Membre Inférieur » droit dans la constitution des 2 axes du premier plan factoriel pour le « grand véhicule ».....	156

Tableau 4 5. Contributions relatives des angles articulaires définissant l'orientation spatiale de la chaîne « Membre Inférieur » gauche dans la constitution des 2 axes du premier plan factoriel pour « le grand véhicule ». ...	156
Tableau 4 6. Contributions relatives des angles articulaires définissant l'orientation spatiale de la chaîne « Tronc + Tête » dans la constitution des 2 axes du premier plan factoriel pour « le grand véhicule ».....	157
Tableau 4 7. Coefficients de corrélation et RMS Normalisées calculées entre les trajectoires mesurées et simulées sur le « petit véhicule » des points caractéristiques pour le sujet 12 réalisant la sous stratégie LS.	166
Tableau 4 8. Coefficients de corrélation et RMS Normalisées calculés entre les angles articulaires et l'orientation spatiale du bassin adaptés et simulés pour le sujet 12 réalisant la sous stratégie LS.	168
Tableau 4 9. Caractéristiques angulaires des sujets représentant fictifs des stratégies d'entrée identifiées sur « le petit véhicule ».	170
Tableau 4 10. Distances calculées entre les caractéristiques angulaires des sujets réels réalisant la sous stratégie LS et celles du sujet fictif représentant la stratégie LS sur le « petit véhicule ».	170
Tableau 4 11. Caractéristiques angulaires des sujets réels représentant « au mieux » les sous stratégies d'entrée identifiées sur le « petit véhicule ».	170
Tableau 4 12. Distances calculées entre les caractéristiques angulaires du mouvement simulé et celles des sujets réels représentant les sous stratégies identifiées sur le « petit véhicule ».	171
Tableau 4 13. Coefficients de corrélation et RMS Normalisées calculées entre les trajectoires mesurées et simulées des points caractéristiques sur le « grand véhicule » pour le sujet 12 réalisant la sous stratégie LS.	173
Tableau 4 14. Coefficients de corrélation et RMS Normalisées calculés entre les angles articulaires et l'orientation spatiale du bassin adaptés et simulés sur le « grand véhicule » pour le sujet 12 réalisant la sous stratégie LS.	175
Tableau 4 15. Caractéristiques angulaires des sujets fictifs représentant les sous stratégies d'entrée identifiées sur le « grand véhicule ».	177
Tableau 4 16. Distances calculées entre les caractéristiques angulaires des sujets réels réalisant la stratégie LS et celles du sujet fictif représentant « au mieux » la stratégie LS sur le « grand véhicule ».	177
Tableau 4 17. Caractéristiques angulaires des sujets réels des différentes stratégies d'entrée identifiées sur le « grand véhicule ».	177
Tableau 4 18. Distances calculées entre les caractéristiques angulaires du mouvement simulé et celles des sujets réels représentants des sous stratégies identifiées sur le « grand véhicule ».	178
Tableau 4 19. Coefficients de corrélation et RMS Normalisées calculés entre les trajectoires des points caractéristiques mesurées et simulées pour le sujet 16 réalisant la sous stratégie TB.	180
Tableau 4 20. Coefficients de corrélation et RMS Normalisées calculés entre les angles articulaires et l'orientation spatiale adaptés et simulés sur le Véhicule Simulation (le « grand véhicule ») pour le sujet 16 réalisant la sous stratégie TB.	182
Tableau 4 21. Distances calculées entre les caractéristiques angulaires du mouvement simulé et celles des sujets représentants des différentes sous stratégies identifiées sur le grand véhicule.	184
Tableau 4 22. Coefficients de corrélation calculés entre les angles articulaires et l'orientation spatiale du bassin adaptés sur le Véhicule Expérimental et simulés sur le Véhicule Simulation pour le sujet 19 réalisant la sous stratégie MM.	186
Tableau 4 23. Coefficients de corrélation et RMS Normalisées entre les trajectoires reconstruites (à l'aide du MGD) et simulées pour le sujet 19 réalisant la sous stratégie MM.	188

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Les pays industrialisés connaissent depuis plusieurs années une croissance du nombre de personnes de plus de 60 ans (Pochet, 2003). En France plus particulièrement, la population âgée, qui représentait 20% de la population en 2000, atteindra le tiers en 2050 (Brutel, 2002). Ce vieillissement de la population s'accompagnera d'un accroissement de la population handicapée (moteur). Le nombre de conducteurs âgés et déficients moteurs va donc irrémédiablement croître.

L'utilisation de l'automobile est d'une importance souvent capitale pour la participation sociale et professionnelle, l'impossibilité d'utiliser le véhicule pour des personnes âgées et/ou déficientes motrices est toujours douloureusement ressentie. La difficulté éprouvée pour y monter ou en descendre peut être une des principales causes qui conduit certaines personnes à ne plus utiliser leur véhicule. En effet, ce mouvement a priori anodin est pour la population la plus âgée un acte moteur difficile qui peut les contraindre à arrêter définitivement la conduite (Cappelaere et al., 1991). Les constructeurs automobiles l'ont compris et s'intéressent aujourd'hui à cette population vieillissante sujette à des troubles de l'appareil locomoteur ainsi qu'à ce geste complexe nécessitant une coordination précise des mouvements articulaires du corps humain (Gransitzki, 1994).

De manière générale, pour évaluer la satisfaction de leurs clientèles, les constructeurs automobiles demandent à des sujets, appartenant à la population ciblée, de réaliser des mouvements d'entrée-sortie sur des prototypes ou des maquettes à échelle réelle. Le jugement subjectif retourné par les personnes participant aux expérimentations est alors corrélé aux dimensions du véhicule (Sternini et Cerrone, 1995). Cependant, la construction de ce(s) prototype(s) non « réutilisable(s) », le nombre de sujets et l'analyse des données engendrent des coûts importants. De plus, l'étape d'évaluation est réalisée vers la fin du processus de conception, les corrections sur les prototypes ne sont pas toujours possibles (Verriest, 2000). Dans ce contexte, les constructeurs souhaitent avancer cette étape plus en amont dans le processus de conception (Tessier Y., 2000).

Les constructeurs voient dans l'usage de l'outil informatique une solution. En effet, grâce aux progrès croissants de l'ingénierie simultanée, de nouvelles méthodes d'évaluation émergent. C'est le cas des mannequins numériques qui contribuent à réduire d'une façon significative les délais et les coûts de production (Hanson et al., 2006). L'idée est de proposer et de concevoir des modèles virtuels de l'opérateur humain capables de représenter, voir même de prédire, le comportement et l'interaction de l'opérateur avec son environnement. Leur usage doit permettre les évaluations et les analyses ergonomiques afin de déduire des informations sur les contraintes subies par l'opérateur (Wang, 2003).

Plusieurs mannequins existent sur le marché, citons JackTM, RamsisTM, SafeworkTM. Cependant, leur utilisation se limite aujourd'hui encore à simuler et/ou évaluer des mouvements relativement simples tels que l'atteinte (Zhang et al., 1998; Chaffin et al., 1999; Hanson et al., 1999; Caputo et al., 2001; Lim et al., 2004; Zhu et al., 2004; Kuo et Chu, 2005), le débrayage (Wang, 2002; Freeman et Haslegrave, 2004; Oudenhuijzen et al., 2004), le bouclage de la ceinture de sécurité (Monnier et al., 2002) ou l'ouverture de la portière (Mavrikios et al., 2006).

Peu de recherches portent sur l'évaluation ou la simulation du mouvement d'entrée-sortie. Les quelques études existantes semblent impliquer uniquement des populations ne présentant aucune déficience motrice. Les seuls travaux incluant des personnes âgées et/ou déficientes motrices n'ont pas atteint le stade de la simulation ni celui de l'évaluation de l'inconfort.

Le projet national HANDIMAN (RNTS 2004) se focalise sur ces problématiques. Il vise à intégrer la phase d'évaluation de l'inconfort du mouvement d'entrée-sortie, dès les premières phases de la conception du véhicule automobile. Le HANDIMAN est un homme virtuel tridimensionnel « Handicapé » capable d'une part, d'entrer et de sortir dans un véhicule automobile et d'autre part, de spécifier la gêne ressentie lors de la réalisation de son mouvement. La rétroaction doit permettre l'optimisation des dimensions du véhicule en accord avec la déficience motrice considérée (Cf. Fig. 1).

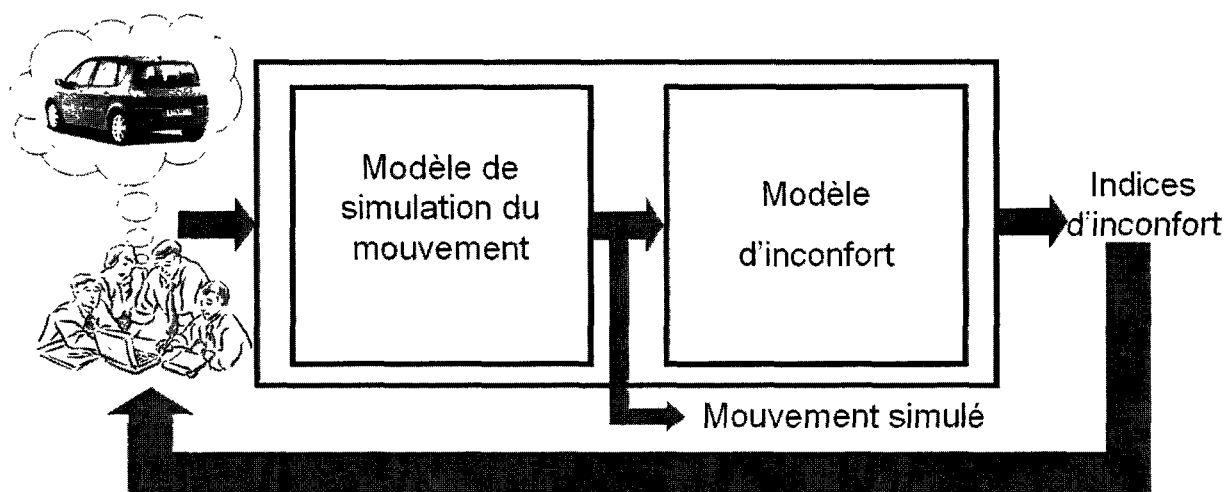


Figure I 1. Objectifs visés par le projet HANDIMAN.

Ce projet national a pour objectif d'apporter des éléments de réponse à deux problématiques scientifiques distinctes : la simulation du mouvement réaliste complexe et l'évaluation de son inconfort.

Les travaux entrepris dans cette thèse s'inscrivent dans ce contexte et tentent d'apporter une solution au problème de la simulation réaliste et complexe du mouvement d'accessibilité automobile. Plus particulièrement, nous ciblons la simulation cinématique du

mouvement d'entrée chez les populations impliquées dans le projet HANDIMAN. La démarche de simulation que nous proposons se positionne dans la continuité et la complémentarité des travaux de (Lempereur, 2006) (Cf. Chapitre 5), qui visaient à simuler le mouvement d'entrée d'une personne à anthropométrie variable dans un véhicule à géométrie fixe. Dans cette thèse, nous cherchons à simuler le mouvement d'entrée d'une personne à anthropométrie fixe (même sujet) dans des véhicules à géométrie variable.

Le manuscrit se décompose en 5 chapitres qui synthétisent l'essentiel de nos travaux menés sur cette problématique.

Le premier chapitre présente une revue de littérature concernant les étapes conduisant à la simulation du mouvement humain à partir de données réelles. Cinq parties essentielles constituent ce chapitre. La première partie présente un bref aperçu des logiciels de mannequins numériques, leurs caractéristiques, leurs domaines d'application et enfin leurs limites. La deuxième partie réalise un tour d'horizon des quelques études existantes dans la littérature et qui traitent du mouvement d'accessibilité automobile. Cette partie présente les différents types de plateformes expérimentales et quelques résultats issus des analyses de ce mouvement : les stratégies motrices mises en œuvre, la simulation de ce mouvement chez les personnes jeunes et âgées et/ou handicapées et enfin l'étude ergonomique de ce mouvement. La troisième partie précise les différentes étapes menant à la construction d'une base de mouvements à partir de l'expérimentation sur l'être humain. Dans cette partie sont présentés : les outils de mesures du mouvement, leurs caractéristiques, leurs avantages et leurs limites. L'accent est alors mis sur les erreurs liées aux systèmes optoélectroniques et les solutions proposées dans la littérature pour remédier à ces problèmes. Enfin, les apports de la biomécanique en termes de modélisation du mouvement humain concluent cette partie. La quatrième partie présente les méthodes de quantification et de classification des mouvements humains. Deux grandes classes de méthodes sont distinguées : les méthodes à base d'observations et les méthodes automatiques. La cinquième partie conclut sur les deux principales classes de techniques de simulation, à base de connaissances sur le mouvement et à partir de bases de données/de mouvements, ainsi que quelques méthodes appartenant à ces deux classes.

Une solution, en 3 étapes, au problème de la simulation du mouvement d'entrée dans des véhicules à géométrie variable est alors décrite dans le chapitre 2 et le chapitre 3.

Le chapitre 2 présente, dans une première partie, les hypothèses et les restrictions à l'étude, le modèle cinématique de l'homme retenu pour la simulation et ses paramètres. La seconde étape de la méthodologie est ensuite présentée. Elle concerne l'analyse et l'identification automatique des stratégies d'entrée dans un véhicule automobile. Cette étape procède en quatre phases à base de calculs statistiques à l'issue desquelles les stratégies et les sous stratégies du mouvement d'entrée seront identifiées et caractérisées. La troisième et

dernière étape de la méthodologie décrit l'algorithme mis en œuvre pour simuler le mouvement d'entrée dans des véhicules à géométrie variable.

Le chapitre 3 revient principalement sur la première étape de la méthodologie. Cette étape apporte les données nécessaires à l'application des 2 dernières étapes précédemment présentées. Dans une première partie, le dispositif et le protocole expérimental mis en œuvre dans l'étude est décrit. Puis, dans une deuxième partie, les traitements numériques permettant de rendre les données mesurées exploitables pour les méthodes proposées sont précisés.

Le quatrième chapitre présente les résultats. Ce chapitre est constitué de deux parties. Une première partie présente les résultats de l'analyse statistique du mouvement et décrit les stratégies et les sous stratégies du mouvement d'entrée identifiées. La deuxième partie présente les résultats de simulation. Quatre simulations sont considérées : une première simulation a pour objet la validation de la démarche proposée, la deuxième et troisième simulation concernent la simulation de deux stratégies d'entrée bien distinctes et une dernière simulation tente d'expliquer les changements de stratégie observés chez certains sujets lors du passage d'un véhicule à un autre.

Le cinquième chapitre est dédié aux perspectives de recherches. Dans une première partie, ce chapitre réalise une critique du travail réalisé et propose certaines améliorations. Dans une deuxième partie, des perspectives de recherches à plus long terme sont proposées. Elles concernent l'amélioration de l'outil de simulation, la prise en compte des différences intra- individuelles des sujets, de la dynamique du mouvement, ou encore l'élaboration de nouveaux indices ergonomiques afin d'estimer l'inconfort associé aux mouvements simulés.

Enfin, nous achevons ce mémoire par une conclusion générale.

CHAPITRE 1
REVUE DE LITTERATURE

CHAPITRE 1 : REVUE DE LITTÉRATURE

1.1 INTRODUCTION

L'objectif de ce chapitre est de présenter une revue de littérature relative aux différentes étapes conduisant à la simulation du mouvement humain, et plus particulièrement à celui de l'accessibilité au véhicule automobile à partir de données réelles. Cinq parties composent ce chapitre :

Une première partie présente un bref aperçu en terme d'existant sur les logiciels de mannequins numériques, outil commercial et de recherche qui vise à simuler et évaluer des mouvements humains. Sont présentés successivement, leurs caractéristiques, leurs domaines d'applications et enfin leurs limites notamment pour simuler les mouvements tridimensionnels complexes comme l'accessibilité automobile.

L'absence de réponse dans l'usage des mannequins numériques pour simuler le mouvement d'accessibilité conduit à explorer les travaux majeurs de la littérature relatifs au mouvement d'accessibilité au véhicule. Dans une première partie, les plateformes expérimentales et quelques résultats obtenus dans le cadre de l'analyse du mouvement d'accessibilité sont présentés. Puis, dans une deuxième partie, les quelques études relatives à la simulation de ce mouvement sont introduites. Enfin, l'analyse ergonomique de ce mouvement est abordée et permet d'isoler les parties du véhicule automobile susceptibles d'influencer le mouvement d'accessibilité.

A la vue des travaux concernant l'accessibilité au véhicule, la résolution de notre problématique nous oblige à explorer les techniques pour simuler les mouvements humains. Ces dernières peuvent se répartir en deux groupes : les techniques dites à base de connaissances sur le mouvement et les techniques dites à base de données (de mouvements). Les techniques à base de données apparaissent bien adaptées à notre problème. Elles imposent la construction d'une base de mouvements préalable.

Ce fait nous conduit naturellement à détailler les différentes étapes menant à la construction d'une base de mouvements à partir de l'expérimentation sur l'être humain. Dans une première partie, les outils de mesures cinématiques couramment utilisés sont présentés. Une attention particulière est portée sur leurs caractéristiques, leurs avantages et leurs limites. Une description des systèmes optoélectroniques vient compléter cette partie. Leurs avantages, les erreurs inhérentes à leur utilisation, ainsi que les méthodes existantes pour limiter leur incidence sont précisés. Cette partie se termine par la présentation des apports de la biomécanique en terme de modélisation du mouvement humain.

Enfin ce chapitre se termine sur la quantification et la classification des mouvements humains. Deux grandes classes de méthodes sont alors distinguées : les méthodes à base d'observations et les méthodes quantitatives.

1.2 LES MANNEQUINS NUMERIQUES

1.2.1 Introduction

La conception assistée par ordinateur (CAO) et plus particulièrement la maquette numérique sont d'une utilisation croissante dans l'industrie automobile (Chedmail et al., 2002). Ces outils permettent de valider des concepts bien en amont dans le processus de conception. Ils limitent ainsi la fabrication et l'utilisation de maquettes physiques trop onéreuses, qui augmentaient significativement la durée du cycle de conception (Porter et al., 1993; Chaffin, 2001; Hanson et al., 2006). Le mannequin numérique s'inscrit dans cette logique et trouve des applications dans bien d'autres domaines.

Depuis environ cinq décennies plusieurs équipes de recherche à travers le monde ont fait de ce challenge leur principal axe de recherche. Une conférence internationale (SAE Digital Human Modeling for design and engineering) et une revue internationale (International Journal of Human Factors Modelling and Simulation (IJHFMS) ISSN (Online) : 1742-5557 - ISSN (Print) : 1742-5549) sont aujourd'hui dédiées exclusivement à la communication des avancées obtenues dans ce domaine (Duffy, 2005). L'objectif de cette partie est de présenter un bref état de l'art sur les mannequins numériques, leurs caractéristiques, leurs applications et enfin leurs limites.

1.2.2 Les mannequins numériques : une histoire

Initialement, les mannequins numériques permettaient la représentation graphique d'une forme humaine numérique en conditions statiques et pour laquelle il était essentiellement possible de faire varier les dimensions anthropométriques et certains éléments de sa posture. Aujourd'hui plus de 150 mannequins numériques de structures beaucoup plus complexes existent (Suescun et al., 2001). Ces mannequins numériques peuvent être insérés dans des environnements CAO complexes et offrent de nombreuses possibilités d'analyse et d'évaluation.

Le mannequin SAMMIE (System for Aiding Man Machine Interaction Evaluation), conçu à l'université de Nottingham en 1965 pour l'analyse anthropométrique, est l'un des premiers mannequins numériques (Suescun et al., 2001). En 1969 Ryan et Springer (Ryan et Springer, 1969) conçoivent pour la compagnie Boeing Aircraft un mannequin numérique nommé BOEMAN (Chaffin, 2001). Ce mannequin est utilisé pour prédire l'espace d'atteinte d'un homme de taille moyenne assis dans un cockpit d'un avion de chasse. D'autres mannequins sont apparus depuis, comme : COMBIMAN en 1974 (Bapu et al., 1981;

Mcdaniel, 1990), CALSPAN 3D CVS en 1975, CYBERMAN en 1980 (Blakeley, 1980), ERGOMAN en 1982, ANTHROPOS-ERGOMAX au début des années 80, CREWCHIEF en 1984 (Mcdaniel, 1990), ANYBODY et SAFEWORK en 1985 (Fortin et al., 1990), RAMSIS (Seidl et Speyer, 1997) en 1987, ANTHRO et JACK en 1988 (Badler et al., 1993), ANYSIM et TOMMY développés par Kamusella à l'université technique de Dresden en Allemagne en 1989, ANTHROPOS et MADYMO 3D en 1990, MAN3D (Verriest, 1991) en 1991, AW-MAN (Striepe et Yu, 1994) en 1994, ERGOMAN - PROCESS ENGINEER au milieu des années 90, 3D HUMAN en 1997 (Sengupta et Das, 1997) et MANERCOS (Chevriau et al., 2003) en 1998. Enfin le mannequin SANTOS (2003), qui offre de nombreuses fonctionnalités, est probablement la version de mannequin numérique la plus évoluée (Abdel-Malek et al., 2006; Yang et al., 2007) (Cf. Annexe A.1.1).

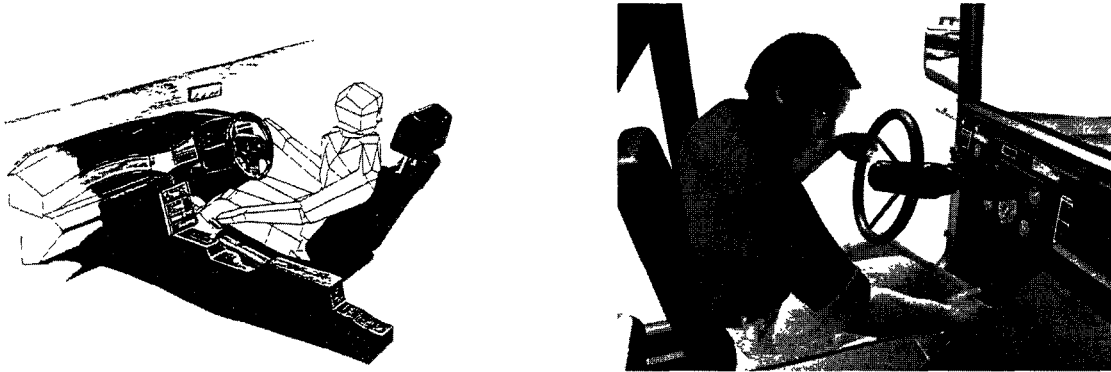


Figure 1 1. *Les mannequins numériques SAMMIE (1965) et SANTOS (2003).*

1.2.3 Caractéristiques des mannequins numériques

Le mannequin numérique peut représenter un homme, une femme (Yang et al., 2007) ou un enfant (Arlt et Marach, 1998), il peut être maigre, gros... (Wang, 2005). Cela est rendu possible grâce à l'existence de bases de données anthropométriques représentatives de populations différentes ; citons par exemple : ERGOKIT pour la population Brésilienne (Guimaraes et al., 2004), CAESAR pour la population nord américaine et européenne (Brodeur, 2004), Jack_HRM pour des sujets masculins nord américains, Jack_SAE pour le 50^{ème} percentile de sujets masculins développé pour la SAE (Society of Automotive Engineers), Jack_Japan pour toutes les générations japonaises (Kouchi et al., 2004).

Ajouté à cela, les mannequins numériques prennent aujourd'hui en considération les limites angulaires des articulations, disposent d'un nombre important de degrés de liberté (Cf. Annexe A.1.1) et peuvent vérifier des contraintes biomécaniques et/ou physiologiques à l'aide d'évaluateurs ergonomiques. Ils disposent également d'outils complémentaires : le cône de vision (pour prédire le champ de vision du futur opérateur) (Tehrani et Sharifi, 2008), le domaine atteignable, la manipulation de postures par cinématique directe ou inverse,

l'évaluation du confort postural, la prédiction des mouvements, la prédiction de la fatigue liée à certains mouvements, ils prennent en considération les déformations de la peau et les simulations vestimentaires (Fontana et al., 2006). Depuis quelques années, certains mannequins numériques sont dotés de bases de données intégrant des facultés motrices humaines, leur permettant de réaliser des mouvements bio-inspirés comme Stunan de Faloutsos et al. (Faloutsos et al., 2001). Ils peuvent simuler également l'effet de l'âge sur l'activité humaine (la marche par exemple). Enfin, certains mannequins numériques sont dotés de règles d'évaluation ergonomique comme SSP (Static Strength Prediction), RULA (Chevriau et al., 2003), (Du et Duffy, 2007) et NIOSH (Ambrose et al., 2004). L'annexe A.1.1 décrit succinctement les principaux mannequins numériques.

1.2.4 Les applications

Les mannequins numériques sont principalement utilisés dans les 5 domaines suivants : conception, fabrication, maintenance, formation et communication (Wang, 2008). Dans la conception de produits, les mannequins numériques contribuent :

- à réduire efficacement les temps de production (Hanson et al., 2006; Demirel et Duffy, 2007),
- à améliorer la qualité des produits (Naumann et Roetting, 2007),
- à l'aménagement ergonomique des postes de travail (Backstrand et al., 2007).

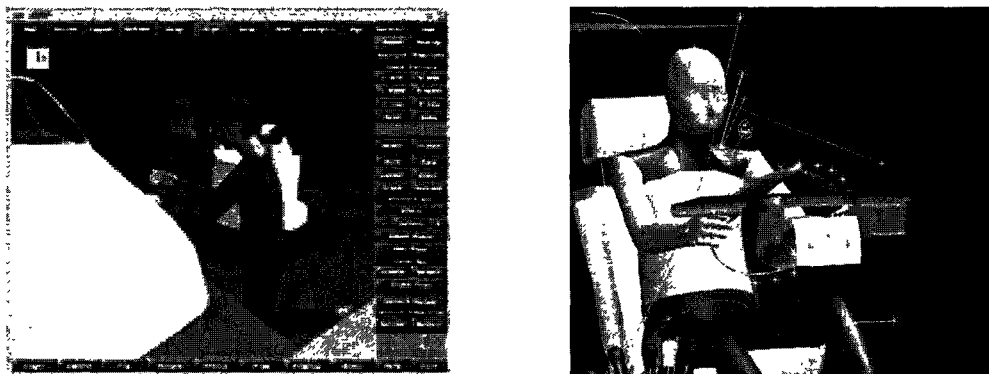


Figure 1 2. *Les mannequins numériques SAFEWORK et RAMSIS.*

Dans la conception des véhicules automobiles, les mannequins numériques sont très largement utilisés (Demirel et Duffy, 2007). Parmi les mouvements liés à la conception de l'espace intérieur d'un véhicule automobile, le mouvement d'atteinte est le mouvement le plus simulé (Zhang et al., 1998; Lim et al., 2004; Rider et al., 2004; Zhu et al., 2004). De nombreux modèles ont été développés pour simuler ce mouvement ; a titre d'exemple, le modèle à base de réseaux de neurones de Hanson et al. (Hanson et al., 1999), ou celui de Chaffin et al. (Chaffin et al., 1999) basé sur des techniques d'optimisation ou de régression fonctionnelle. D'autres chercheurs exploitent les mannequins numériques pour aménager les espaces intérieurs des véhicules industriels. Yang et al. (Yang et al., 2007) utilisent le

mannequin SANTOS pour simuler les mouvements d'atteinte de différentes populations représentant le 5^{ème}, 50^{ème} et 95^{ème} percentiles, à l'intérieur d'une cabine de véhicule de chantier; Wang et al. (Wang et al., 2003) utilisent le mannequin MAN3D pour l'aménagement spatial d'un poste de conduite de grue portuaire à conteneurs.

Les mannequins numériques sont également utilisés pour :

- la simulation du mouvement de débrayage (Wang, 2002; Freeman et Haslegrave, 2004; Oudenhuijzen et al., 2004),
- l'étude de l'effet du port de la ceinture de sécurité (Monnier et al., 2002),
- comparer l'influence de la ceinture de sécurité à 3 points et la ceinture armée (à 4 points) sur les mouvements d'atteinte d'un conducteur (Yang et al., 2004b),
- la simulation du mouvement d'ouverture de la portière d'une voiture (Mavrikios et al., 2006),
- l'étude de l'effet du siège automobile soumis à des vibrations verticales sur le conducteur (Verver et Van Hoof, 2004) et
- l'étude et prédiction de la posture assise du conducteur (Andreoni et al., 2002; Van Hoof, 2004).

Depuis quelques années l'usage des mannequins numériques commence à s'étendre à la simulation des mouvements des personnes à mobilités réduites. Miller et Jenkins (Miller et Jenkins, 2002) ont par exemple développé un mannequin numérique leur permettant de simuler les mouvements d'atteinte des personnes paraplégiques. Li et al. (Li et al., 2006) utilisent le mannequin Jack pour simuler des mouvements liés à la vie quotidienne pour les personnes à mobilité réduite.

1.2.5 Limites techniques ou fonctionnelles des mannequins numériques

Malgré le nombre important de caractéristiques géométriques et biomécaniques (ex. limites articulaires, les dimensions corporelles) implémentées dans les logiciels de mannequins numériques, des limites demeurent (Zhang et Chaffin, 2005). Les mannequins numériques ne répondent pas encore à toutes les attentes de leurs utilisateurs (Chaffin, 2005; Wang, 2008). En effet, les utilisateurs de mannequins numériques souhaitent que ces derniers :

- 1) disposent de larges bases de données anthropométriques représentant différents groupes démographiques,
- 2) puissent effectuer des simulations de mouvements réalistes dans différents environnements en prenant en compte les différentes contraintes présentes,
- 3) prédisent et quantifient les gênes ressenties et liées à la réalisation des mouvements simulés,

- 4) simulent les dynamiques des mouvements et intègrent la modélisation musculo-squelettique pour pouvoir prédire les interactions dynamiques entre les différents corps constituant les mannequins numériques,
- 5) puissent être adaptatifs et puissent ainsi simuler différentes tâches dans différents environnements.

Malheureusement les mannequins disponibles sur le marché ne peuvent pas répondre à toutes ces attentes (Wang, 2008). En effet,

- 1) malgré les larges bases de données dont certains logiciels disposent (comme Jack et RAMSIS), il manque encore, par exemple, des données concernant les personnes à mobilité réduite,
- 2) la plupart des mouvements dits « simulés » par les mannequins numériques résultent de l'animation et peu de connaissances existent sur certains mouvements (comme le mouvement d'accessibilité dans un véhicule automobile), or d'après Chaffin (Chaffin, 2005) les mannequins numériques doivent s'inspirer de plus en plus des mouvements réels (humains) pour simuler des mouvements complexes (comme l'accessibilité automobile) d'une façon plus réaliste,
- 3) les mannequins numériques existants peuvent simuler l'inconfort postural statique, mais pas l'inconfort dynamique, de plus il manque encore des critères génériques d'évaluation de l'inconfort (Wang, 2008),
- 4) les mannequins numériques doivent également inclure des modèles musculo-squelettiques pour pouvoir approfondir les études liées à la gêne et enfin
- 5) les modèles existants aujourd'hui sont peu adaptatifs et sont difficilement transposables à d'autres activités, à d'autres environnements que ceux expérimentés. Par conséquent, aujourd'hui encore, le mannequin numérique diffère particulièrement de l'Homme par son caractère peu adaptatif.

1.2.6 Conclusion

Cette partie a dressé un bref aperçu de l'existant concernant les mannequins numériques et leurs applications. Depuis le premier mannequin numérique, SAMMIE, à l'un des tous derniers, SANTOS, ce n'est pas moins de 150 mannequins numériques qui ont été développés en moins de 50 ans. Bien évidemment, le mannequin numérique aujourd'hui n'a plus beaucoup de ressemblance avec son précurseur. Il possède de nombreuses caractéristiques qui l'apparentent de plus en plus à l'être humain. Son intégration dans les environnements de CAO lui ouvre de nombreuses applications, tant en phase de conception, en production, en maintenance, que pour la formation et la communication, et les applications à l'automobile ne manquent pas (ex. l'amélioration des espaces intérieurs). Néanmoins, malgré les efforts consentis depuis 50 ans, des lacunes persistent. Parmi ces manques, citons

l'absence de bases de données représentatives de certains mouvements complexes tel que le mouvement d'accessibilité au véhicule automobile, des bases de données représentatives des populations à mobilité réduite, ou encore des algorithmes de simulation pour des mouvements tridimensionnels complexes (ex. l'entrée-sortie du véhicule automobile). Par conséquent, les mannequins numériques n'apportent pas encore de solutions au problème de la simulation du mouvement d'accessibilité au véhicule automobile des personnes à mobilité réduite.

1.3 ETUDE DU MOUVEMENT D'ACCESSIBILITE AUTOMOBILE

1.3.1 Introduction

La littérature abonde de travaux sur les mouvements humains ayant trait à l'automobile, citons par exemple : l'atteinte (Reed et al., 2004; Rider et al., 2004; Yang et al., 2004b), le positionnement et le confort du sujet sur le siège automobile (Gyi et al., 1998; Andreoni et al., 2002; Kolich, 2003; Van Hoof, 2004; Verver et Van Hoof, 2004), le bouclage de la ceinture de sécurité (Monnier et al., 2003), le débrayage (Wang, 2002; Freeman et Haslegrave, 2004; Oudenhuijzen et al., 2004; Wang et al., 2004), l'ouverture de la portière (Mavrikios et al., 2006; Mavrikios et al., 2007) ou encore l'accessibilité au véhicule automobile. Pour ce dernier mouvement néanmoins peu de références existent, moins de 20 à notre connaissance. Les études s'y rapportant, s'intéressent prioritairement aux personnes jeunes sans trouble de l'appareil locomoteur. En ce qui concerne les personnes âgées et/ou ayant des déficiences motrices, les études sont encore plus limitées (5 a priori).

Les premiers travaux relatifs au mouvement d'accessibilité au véhicule automobile sont très récents et se focalisent pour la plupart d'entre eux sur la compréhension de ce geste complexe et/ou sur l'identification de stratégies motrices réalisées par les sujets lors du mouvement d'entrée-sortie de véhicule. Les paragraphes suivants proposent une synthèse des travaux concernant le mouvement d'entrée-sortie de véhicule automobile, de son analyse aux tentatives de simulation.

1.3.2 Analyse du mouvement d'accessibilité

Les études portant sur l'analyse du mouvement d'accessibilité sont issues dans leur grande majorité de mesures du mouvement humain en environnement contrôlé, c'est-à-dire en laboratoire. Des maquettes physiques, des dispositifs de mesures et des protocoles expérimentaux sont alors mis en œuvre. Ce paragraphe réalise une synthèse des travaux d'analyse recensés, de la maquette physique à quelques résultats d'analyse.

1.3.2.1 Les maquettes physiques

Pour analyser le mouvement d'accessibilité automobile en laboratoire, les chercheurs ont recours à des représentations de véhicules automobiles. Trois types de maquettes physiques peuvent être distingués.

• Le conformateur

Le conformateur est une version simplifiée d'un véhicule automobile. Il comprend généralement les principaux éléments de la partie avant du véhicule : siège conducteur, volant, plancher, bavolet*, brancard*, pied milieu* et pied avant*. Malgré les simplifications opérées, 90% des sujets impliqués ne trouvent aucune différence entre le véhicule simplifié et le véhicule réel correspondant (Sternini et Cerrone, 1995). Leur utilisation peut mener à des études globales concernant le mouvement d'entrée-sortie. C'est le cas des travaux de Lempereur (Lempereur, 2006), qui utilise une représentation très simplifiée de la Citroën Xantia pour étudier le mouvement d'entrée de 21 sujets sains (Cf. Fig. 1.3). D'autres études se focalisent sur des parties spécifiques du véhicule, comme le siège (Fritz et al., 2003), le plancher, le pied avant ou encore le pied milieu* (Kawachi et al., 2005; Kawachi et al., 2007).

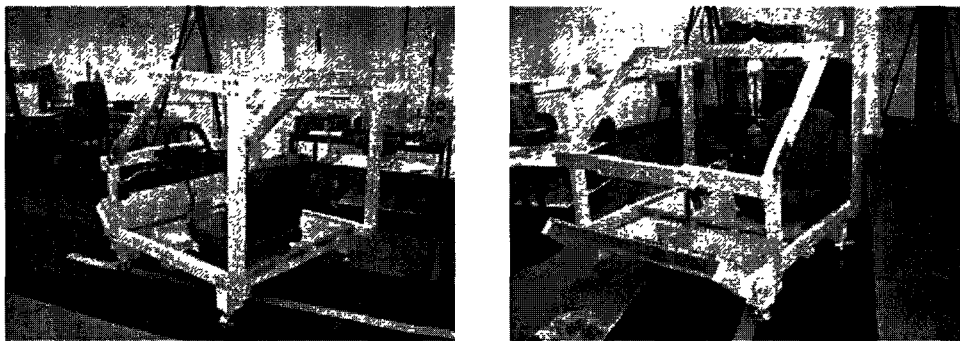


Figure 1 3. *Conformateur représentant le poste de conduite d'une Citroën Xantia, utilisé par Lempereur (Lempereur, 2006) dans l'étude du mouvement d'entrée.*

• Le véhicule automobile modifié

D'autres auteurs construisent leurs maquettes physiques à partir des « restes » de véhicules réels. Dans ce cas, les auteurs veillent à préserver le maximum de caractéristiques physiques des véhicules considérés. Dans ce cadre, Petzäll (Petzäll, 1995) utilise une carcasse d'un taxi afin de construire une maquette pour étudier le mouvement d'entrée du côté passager pour des personnes présentant des déficiences motrices. Andreoni et al. (Andreoni et al., 2004) utilisent une réplique d'une Alpha Roméo 155. Hanson et al. (Hanson et al., 2007) construisent un simulateur physique à partir d'éléments d'une SAAB 900s. D'autres études considèrent plusieurs véhicules. C'est le cas du projet européen REALMAN (IST 2000-29357, (Lestrelin et Trasbot, 2005) ou encore du projet national HANDIMAN (RNTS 2004) (Ait El Menceur et al., 2006; Ait El Menceur et al., 2007). Dans le projet HANDIMAN,

quatre véhicules, représentant une large gamme de berlines du marché, sont utilisés (Cf. Fig. 1.4). Ces maquettes considèrent la partie conducteur : d'une Ford Fiesta (première génération), une Renault Mégane (première génération), un Peugeot 806 (Petit monospace) et un Renault Kangoo (Utilitaire).

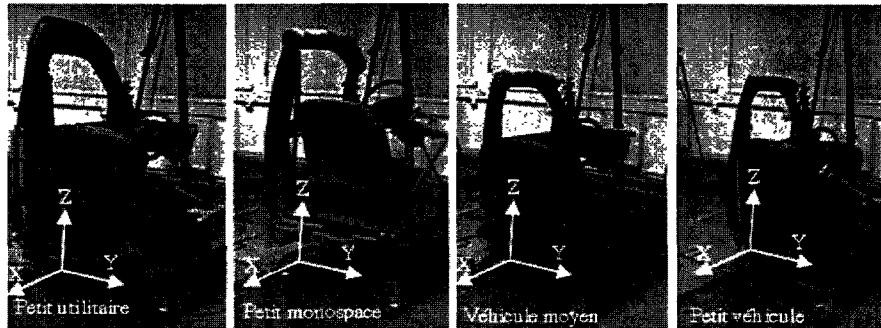


Figure 1 4. *Les quatre véhicules utilisés pour étudier le mouvement d'accessibilité des personne âgées et/ou handicapées dans le cadre du projet HANDIMAN (Ait El Menceur et al., 2008a)*

• L'habitacle paramétrable

D'autres études considèrent des habitacles paramétrables. Les travaux de Loczi (Loczi, 1993) exploitent un habitacle où plusieurs paramètres véhicules peuvent être modifiés (hauteur du siège, hauteur de la portière et position du siège). Andreoni et al. (Andreoni et al., 1997) font varier la hauteur de la portière. Giacomini et Quattrocchio (Giacomini et Quattrocchio, 1997) utilisent un simulateur constitué d'un siège conducteur derrière lequel est placé un autre siège (passager) aux paramètres réglables (hauteur, inclinaison du dossier...). Ils modifient une portière d'une Alfa Romeo 155 pour en faire une portière dont la hauteur, la distance la séparant des 2 sièges ainsi que l'angle d'ouverture peuvent être changés. Nakahama et al. (Nakahama et Nemoto, 2000) considèrent également un habitacle paramétrable où la hauteur du siège et la hauteur du bavolet peuvent être réglées. Les auteurs soulignent l'importance de la hauteur du siège pour l'accessibilité des personnes âgées. Enfin la version la plus complète d'habitacles paramétrables semble revenir à la firme BMW. Cet habitacle est dénommé Variable ingress and Egress Mock-up (VEMO) (Cf. Fig. 1.5) (Rigel et al., 2003; Cherednichenko et al., 2006). Vingt trois paramètres peuvent être réglés dans cet habitacle, permettant ainsi de représenter tous les véhicules de la firme BMW (allant de la Mini en passant par la X5 pour arriver au Rolls Royce) (Rigel et al., 2003).

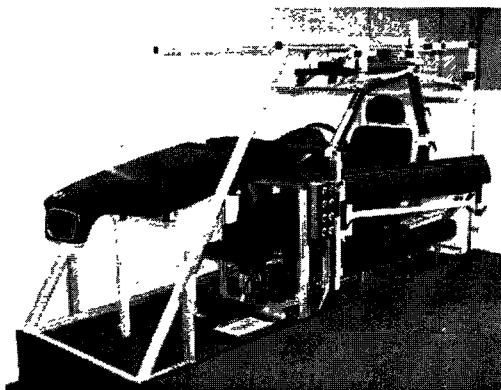


Figure 1 5. L’habitacle paramétrable VEMO de la firme BMW (Rigel et al., 2003).

1.3.2.2 Protocoles et dispositifs de mesures

• Les populations impliquées dans les études

Le tableau 1.1 présente une synthèse des populations impliquées dans les travaux recensés relatifs au mouvement d’accessibilité au véhicule automobile.

Etude	Type de population	Caractéristiques de la population		
		Age (années)	Taille (cm)	Poids (kg)
Personnes jeunes et saines				
((Sternini et Cerrone, 1995)	20 sujets (10 Hommes ; 10 Femmes)	Non documenté	Non documenté	Non documenté
((Andreoni et al., 1997)	6 sujets (5 Homme ; 1 Femme)	26 à 31	170 à 183	50 à 94
(Fritz et al., 2003)	12 sujets (6 Hommes ; 6 Femmes)	22 à 50	Non documenté	Non documenté
((Andreoni et al., 2004)	10 sujets (6 Hommes ; 4 Femmes)	Non documenté	156 à 190	Non documenté
(Lempereur, 2006)	21 sujets (20 Hommes ; 1 femme)	23.45±3.69	176.7±6.56	68.58±6.01
(Cherednichenko et al., 2006)	15 sujets	Non documenté	150 à 201	Non documenté
Personnes âgées et/ou handicapées				
(Petzäll, 1995)	17 sujets répartis en 2 catégories : 6 sujets (2 Hommes ; 4 Femmes) sont des usagers de fauteuil roulant	35 à 65	160- 172 (femmes) 180 (hommes)	Non documenté
	11 sujets (8 Hommes ; 3 Femmes) sont des personnes présentant des déficiences motrices	40 à 80	160 (femmes) 160-182 (hommes)	Non documenté
(Nakahama et al., 2000)	63 sujets	60 à 84	Non documenté	Non documenté
(Hanson et al., 2007)	40 sujets répartis en 2 catégories :			
	20 sujets jeunes	20 à 25	Non documenté	Non documenté
	20 sujets âgés	60 à 65	Non documenté	Non documenté

(Pudlo et al., 2008)	41 sujets répartis en 3 catégories :			
	8 sujets (6 Hommes ; 2 femmes) jeunes et sains	26±5	175.8±13.4	70±11
	18 sujets (11 Hommes ; 8 femmes) âgés et sains	71±5	165.8±8.9	73±15
	15 sujets (10 Hommes ; 5 femmes) munis de prothèses	62±13	174.3±8.2	85±18

Tableau 1 1. Exemples de populations impliquées dans les études du mouvement d'accessibilité automobile.

La majorité des études portent sur des populations jeunes ne présentant pas de trouble de l'appareil locomoteur. Les études se rapportant aux personnes âgées et/ou déficiente motrice existent mais sont en nombre beaucoup plus limité. Le nombre de sujets impliqués dans ces études est néanmoins plus important (paradoxalement).

• Dispositifs de mesures

Le tableau 1.2 présente une synthèse des matériels mis en œuvre pour analyser le mouvement d'accessibilité au véhicule automobile.

Etude	Système de mesure	Nombre de caméras	Fréquence d'acquisition	Nombre de marqueurs	Véhicule	Dispositif supplémentaire
(Petzäll, 1995)	-	-	-	-	Véhicule modifié	Observation, VHS, Photos, Interviews, temps du mouvement
((Sternini et Cerrone, 1995)	ELITE®	Non documenté	100 Hz	Non documenté	Véhicule modifié (Alpha Roméo 155)	-
((Andreoni et al., 1997)	ELITE®	4	100 Hz	11	Véhicule modifié	-
((Giacomin et Quattrocchio, 1997)	ELITE®	4	100 Hz	11	Véhicule modifié	Questionnaire
(Nakahama et al., 2000)	-	-	-	-	Conformateur	Questionnaire + VHS
(Rigel et al., 2003)	VICON®	14	-	19	Habitacle paramétrable	-
((Andreoni et al., 2004)	ELITE®	2	100 Hz	12	Véhicule modifié	-
(Lempereur, 2006)	VICON®	8	120 Hz	29	Conformateur	-
(Cheredniko et al., 2006)	VICON®	Non documenté	50 Hz	Non documenté	Non documenté	-
(Hanson et al.,	ShapeWrapI	Non	Non	Non	Non	-

2007)	I®	documenté	documenté	documenté	documenté	
(Pudlo et al., 2008a)	VICON®	8	60 Hz	53	4 Véhicules modifiés	Plateformes de force, questionnaire, VHS

Tableau 1 2. Exemples de dispositifs expérimentaux utilisés dans la mesure du mouvement d'accessibilité automobile.

De cette synthèse, il apparaît que les chercheurs utilisent majoritairement les systèmes optoélectroniques pour réaliser leur étude. En effet, ce type de matériel est considéré par (Giacomin et Quattrocchio, 1997) le mieux approprié pour étudier un mouvement complexe tel que celui d'accessibilité.

1.3.2.3 Quelques résultats issus des analyses

Les résultats d'analyse du mouvement d'accessibilité automobile rapportés dans la littérature concernent principalement :

- Le découpage de ce mouvement complexe : en fonction d'interaction du sujet avec les différentes parties du véhicule ou en fonction de postures clés (Cf. Tableau 1.3).
- Définition d'indices et de profils associés à ce mouvement (Cf. Tableau 1.4)

Découpage en fonction d'interaction	Découpage en fonction des postures clés
Gransitzki (1994) (Gransitzki, (1994) découpe le mouvement d'entrée en 4 phases : - l'approche à la voiture, - l'ouverture de la portière, - la réalisation du mouvement d'entrée - et l'ajustement de la position assise	Dufour et Wang(Dufour et Wang, 2005) considèrent 4 postures clés : - passage du pied droit au dessus du bavolet, - passage du bassin au plus près du pied milieu, - passage de la tête au dessous du brancard - passage du pied gauche au dessus du bavolet. Kawachi et al. (Kawachi et al., 2005) décomposent le mouvement d'entrée en 8 phases (Cf. Fig. 1.6).
Fritz et al. (Fritz et al., 2003) décomposent le mouvement d'entrée-sortie en 5 phases : - préparer le mouvement d'entrée, - s'asseoir sur le siège, - adopter la posture assise, - préparer le mouvement de sortie - et sortir complètement du véhicule	
Ait El Menceur et al. (Ait El Menceur et al., 2006) décomposent le mouvement d'entrée en trois phases : - la phase « d'ouverture de la portière », - la phase « d'adaptation du mouvement d'entrée » - et la phase « de positionnement sur le siège ».	

Tableau 1 3. Découpage du mouvement d'accessibilité en fonction de l'interaction avec le véhicule et en considérant des postures clés.

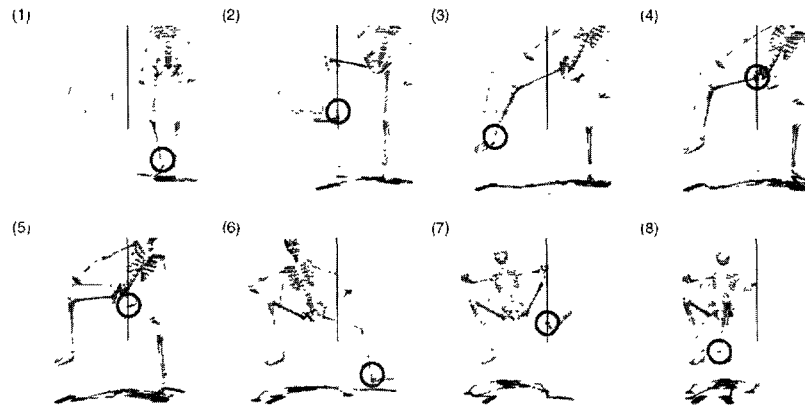


Figure 1 6. Les 8 postures considérées par Kawachi et al. (Kawachi et al., 2005) pour décomposer le mouvement d'entrée.

Etude	Remarques
(Andreoni et al., 1997)	Définissent trois indices de performance pour le mouvement d'entrée correspondant à la projection du centre de masse du corps sur le sol, à la flexion de la hanche gauche et à la flexion de la hanche droite.
(Cherednichenko et al., 2006)	Mettent en évidence l'évolution du mouvement d'entrée en fonction du nombre de mouvements répétés. En effet, ils pensent que : 1) les sujets se familiarisent avec l'habitacle en réalisant entre une à 3 entrées, 2) adaptent leurs mouvements en réalisant entre 4 à 6 mouvements et enfin 3) perfectionnent leurs mouvements d'entrée en le répétant entre 7 à 10 fois. Ils mettent également en évidence la variation des mouvements d'entrée pour une seule personne dans un même habitacle.
(Ait El Menceur et al., 2007)	Présentent trois profils de forces produites lors du mouvement d'entrée dans un véhicule utilitaire.
(Hanson et al., 2007)	Présentent des différences entre le mouvement d'entrée de personnes jeunes et âgées en terme de posture adaptée (les jeunes présentent plus de risques dans leur mouvement) ainsi que la durée du mouvement d'entrée.

Tableau 1 4. Exemples d'indices et de profils associés au mouvement d'accessibilité définis dans la littérature.

1.3.2.4. Conclusion

Au regard de la synthèse bibliographique réalisée, nous pouvons en extraire les points suivants :

- Trois types de maquettes existent : le conformateur, le véhicule réel modifié et l'habitacle paramétrable. Dans le cadre du projet HANDIMAN, le choix du consortium a porté sur le véhicule réel modifié (un petit véhicule, un véhicule moyen, un petit monospace et un petit utilitaire), qui permet de sauvegarder au mieux les caractéristiques physiques de chaque véhicule.

- La majorité des études recensées ciblent des personnes jeunes ne présentant pas de troubles de l'appareil locomoteur. Les études se rapportant aux personnes âgées et/ou déficientes motrice existent mais sont en nombre beaucoup plus limité.
- Parmi les dispositifs de mesures, le système optoélectronique apparaît le plus approprié au mouvement d'entrée-sortie du véhicule automobile.
- Un préambule à l'analyse consiste à découper le mouvement complexe d'entrée-sortie du véhicule automobile en phases.
- Le mouvement d'entrée-sortie évolue en fonction du nombre de répétitions. Par exemple, les sujets adaptent leurs mouvements en réalisant entre 4 et 6 mouvements.
- Des différences intra- individuelles sont observées lors du mouvement d'entrée-sortie.

1.3.3 Identification de stratégies motrices*

Dans la littérature relative au mouvement d'accessibilité, des travaux portent sur l'analyse du comportement observé chez les populations étudiées. Le but peut être d'affiner l'analyse ou d'utiliser les stratégies motrices identifiées pour simuler le mouvement d'accessibilité (Cherednichenko et al., 2006).

Le tableau 1.5 présente des exemples d'études orientées vers la détermination de stratégies d'entrée- sortie de véhicule automobile. Certains chercheurs s'intéressent à la globalité du mouvement d'accessibilité (entrée et sortie) tandis que d'autres ne considèrent qu'une partie de ce mouvement. Des études définissent des stratégies du corps entier alors que d'autres se focalisent sur des parties spécifiques du corps (la tête en particulier). Parmi les études présentées dans le tableau 1.5, celle de Ait El Menceur et al. (Ait El Menceur et al., 2008a) présente une plus grande variété de stratégies d'entrée- sortie dans un véhicule automobile.

1.3.4 Simulation du mouvement d'accessibilité

La simulation du mouvement suppose l'existence d'un modèle biomécanique "suffisamment représentatif" de l'être humain. Les modèles utilisés dans les études sur les mouvements d'accessibilité sont des structures de corps rigides, représentant les segments corporels, reliés par des articulations à un ou plusieurs degrés de liberté. Ces structures sont aussi appelées squelette. Les simulations peuvent chercher à représenter des mouvements de populations jeunes, sans déficience motrice ou au contraire de personnes âgées et/ou déficiente motrice.

1.3.4.1 Les modèles biomécaniques pour étudier le mouvement d'accessibilité automobile

Andreoni et al. (1997), dans une étude portant sur l'analyse des performances humaines lors du mouvement d'entrée-sortie, considèrent un modèle de l'être humain à 16

segments corporels (tête, bras, avant bras, mains, cuisses, jambes, pieds, thorax, abdomen et pelvis). Néanmoins, seuls 6 DDL sont exploités : 2 DDL pour chaque hanche et 1 DDL pour chaque

Tableau 1.5. Stratégies motrices d'accessibilité automobile du corps entier et d'une partie du corps rapportées dans la littérature.

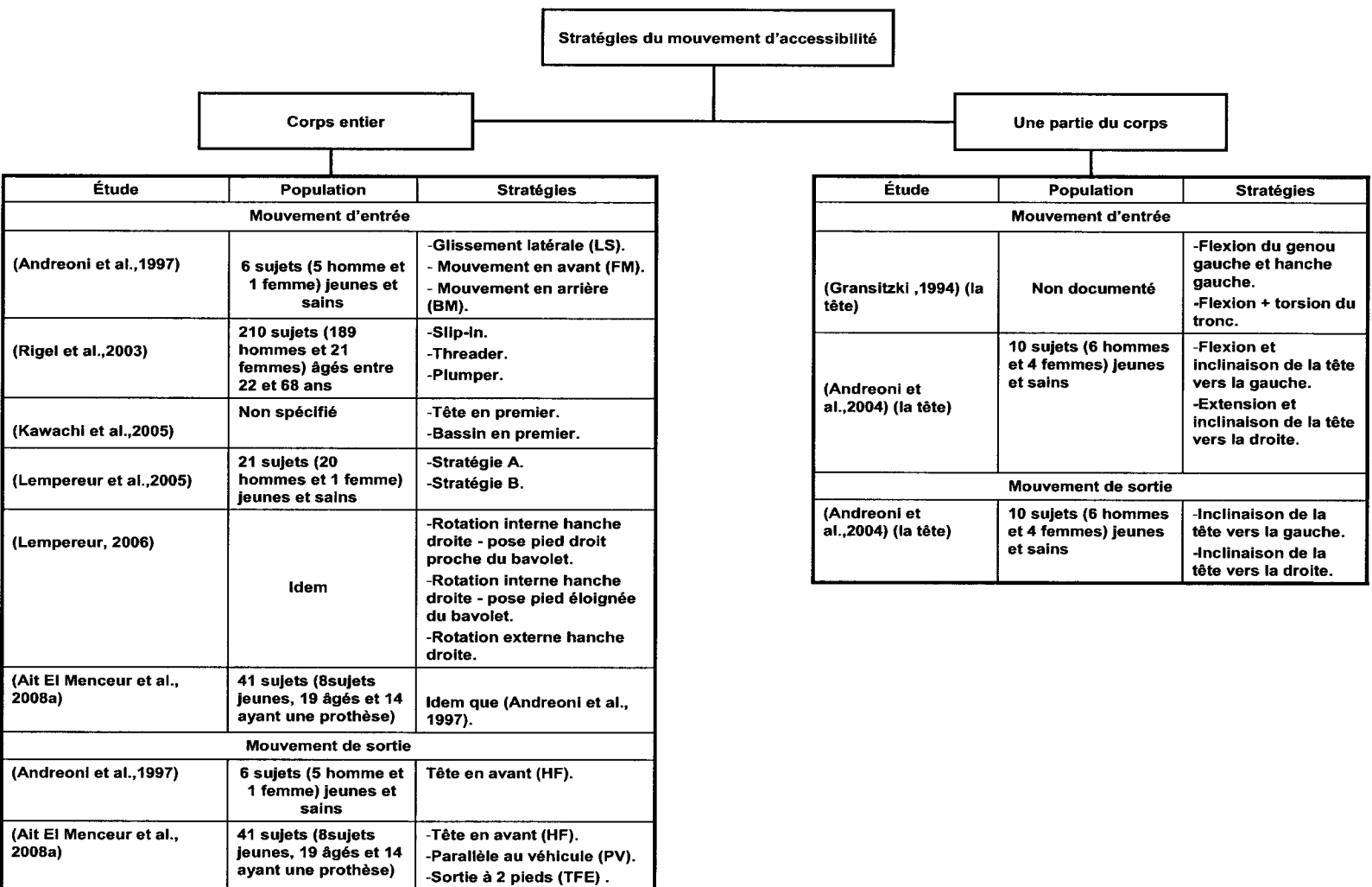


Tableau 1.5. Stratégies motrices d'accessibilité automobile du corps entier et d'une partie du corps rapportées dans la littérature

genou) auxquels s'ajoutent 3 DDL représentant l'orientation spatiale du tronc par rapport au repère laboratoire. Andreoni et al. (1997) choisissent un modèle à deux segments, un pour le tronc et un pour la tête. Une articulation de type rotule lie ces deux segments. Kawachi et al. (Kawachi et al., 2005) développent un modèle du corps à 18 DDL pour étudier le mouvement d'entrée. Les DDL se rapportent à l'orientation et l'inclinaison du tronc, inclinaison du cou et du bassin et les angles des membres inférieurs. Lempereur (Lempereur, 2006) définit un modèle muni de deux chaînes cinématiques simples connectées à un corps de référence (le tronc) (Cf. Fig.1.9). Chaque chaîne est constituée de 3 segments représentant la cuisse, la jambe et le pied. Les segments corporels sont reliés entre eux par 7 DDL (3 DDL pour la hanche, 2 DDL pour le genou et 2DDL pour la cheville). Au total le modèle comporte 14 DDL, auxquels s'ajoute 6 DDL permettant l'orientation spatiale et la position du tronc par rapport au repère de référence. Dans une autre étude, Lempereur et al.(Lempereur et al., 2004) conseillent de découper le tronc au moins en deux segments pour tenir compte de la complexité du mouvement d'entrée-sortie.

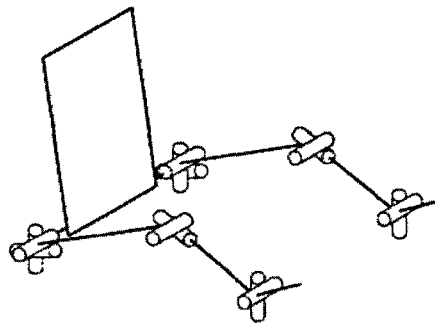


Figure 1 7. *Modèle géométrique et cinématique proposé par Lempereur (Lempereur, 2006) pour simuler le mouvement d'entrée dans un véhicule automobile.*

Il semble donc qu'aucune étude, parmi celles rapportées dans la littérature, ne tient compte des membres supérieurs. L'absence d'inconfort associé aux membres supérieurs peut expliquer cette omission.

1.3.4.2 Simulation du mouvement d'accessibilité pour les personnes jeunes

Le tableau 1.6 présente une synthèse des études bibliographiques ayant abordées la simulation du mouvement d'accessibilité des personnes jeunes.

Etude	Méthode	Remarques
(Andreoni et al., (1997).	Ils simulent la cinématique du mouvement d'entrée-sortie d'un sujet appartenant à leur base de mouvements sur un autre véhicule (de géométrie différente) en se rapportant à l'observation d'autres mouvements d'entrée-sortie réalisés par le même sujet et en considérant d'autres géométries. La simulation est basée sur la résolution d'un programme d'optimisation sous contraintes (ex. évitement de collision).	Aucun résultat n'est présenté et ne permet de valider la méthodologie, qui est par ailleurs peu détaillée.
(Lestrelin et Trasbot, 2005)	Ils présentent la démarche de simulation dans le cadre du projet européen REALMAN (IST n°2000-29357). L'approche à base de données et l'approche à base de connaissances sont combinées dans ce projet pour choisir, adapter et simuler les mouvements d'entrée.	Les visuels sont réalistes, mais ne sont pas comparés aux mouvements réels effectués par les sujets.
(Rasmussen et Christensen, 2005)	Ils simulent le mouvement de sortie de la population appartenant au 50 ^{ème} percentile de l'homme européen, en considérant un modèle musculosquelettique de l'être humain. Ils utilisent le mannequin AnyBody, ils calculent la répartition des efforts musculaires en utilisant un calcul par optimisation.	Leurs résultats restent théoriques (animation). Les auteurs manquent de données expérimentales pour valider leurs travaux
(Cherednichenko et al., 2006)	Ils simulent le mouvement d'entrée d'une stratégie d'entrée identifiée par Rigel et al. (Rigel et al., 2003). Ils considèrent la notion de LBP (Leading Body Parts) pour générer des trajectoires pour le mouvement d'entrée. Les LBP correspondent à des parties du corps humains qui conduisent d'autres parties	Leur méthode semble donner de bons résultats. Néanmoins peu de détails sont présentés, ce qui rend son application pas envisageable.
(Lempereur, 2006)	Il propose une procédure en quatre étapes pour simuler le mouvement d'entrée des membres inférieurs de personnes d'anthropométries variables dans un habitacle à géométrie fixe (Cf. Fig 1.10). Une première étape leur permet d'adapter les angles articulaires calculés à partir de la capture du mouvement par un système optoélectronique de type VICON®. Une seconde étape porte sur l'analyse du mouvement d'entrée en vue d'en extraire des stratégies motrices. Une troisième étape porte sur la simulation d'une partie du mouvement d'entrée. Et enfin une quatrième étape aborde la simulation du mouvement d'entrée via le calcul des angles articulaires.	Cette démarche permet à Lempereur (Lempereur, 2006) de simuler des mouvements qui présentent de bonnes corrélations avec les mouvements réels (mesurés). Cependant, cette démarche ne permet pas de simuler le mouvement d'entrée dans un habitacle de taille variable.

Tableau 1 6. Synthèse d'études abordant la simulation du mouvement d'accessibilité pour les personnes jeunes.

Peu d'études proposent donc de simuler mouvement d'entrée-sortie du véhicule automobile. Les premiers à simuler le mouvement d'entrée-sortie semblent être Andreoni et al. (1997). L'identification des stratégies motrices apparaît une étape importante dans le processus de simulation (Rigel et al., 2003). La démarche proposée par Lempereur

(Lempereur, 2006) fait apparaître de bonnes corrélations entre les simulations et les mouvements expérimentaux mesurés. Elle ne permet cependant pas de simuler le mouvement d'entrée dans un véhicule à géométrie variable.

1.3.4.3 Simulation du mouvement d'entrée-sortie de personnes à mobilité réduite

Aucune étude parmi celles citées précédemment ne propose de simuler le mouvement d'accessibilité pour des personnes à mobilité réduite. Le projet HANDIMAN (RNTS 2004) (Pudlo et al., 2008) est le seul projet (à notre connaissance) qui propose de simuler le mouvement de ce type de population. Ce projet a pour objectif d'intégrer la phase d'évaluation de l'inconfort d'un mouvement d'entrée-sortie dès les premières phases de la conception d'un véhicule automobile et cela en utilisant la simulation. Le HANDIMAN est un homme virtuel tridimensionnel « Handicapé » capable de simuler le mouvement d'entrée/sortie d'un véhicule et de « spécifier » la gêne ressentie lors de sa réalisation. Le mouvement d'accessibilité est visualisé en utilisant le mannequin MAN3D (Cf. Figure 1.8).

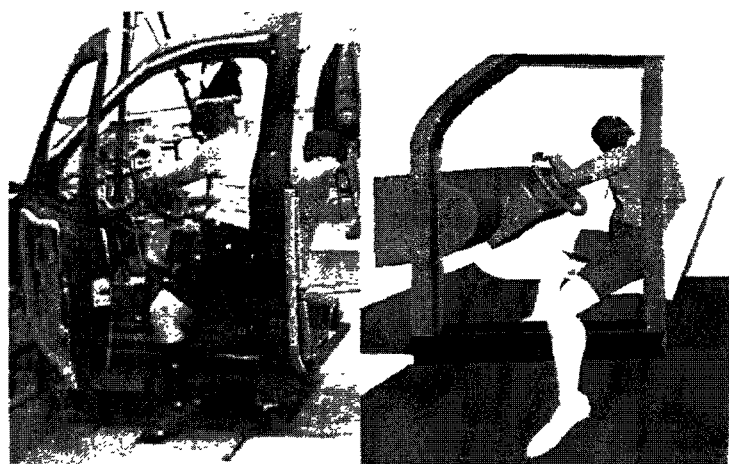


Figure 1 8. *Visualisation d'une posture d'entrée d'une personne âgée ayant deux prothèses de hanches et une prothèse au genou gauche par le logiciel MAN3D (Wang, 2008).*

1.3.5 Etude de l'ergonomie du mouvement d'entrée-sortie

Des études abordent le mouvement d'entrée-sortie au véhicule suivant un point de vue ergonomique. Ces travaux ont pour objectif d'évaluer l'inconfort engendré lors de la réalisation de ce mouvement. Le tableau 1.7 présente une synthèse des études qui portent sur l'ergonomie de ce mouvement.

Etude	Résultats
(Loczi, 1993)	<ul style="list-style-type: none"> - Il montre que la hauteur du siège et de la portière ont des effets significatifs sur les paramètres cinématiques et cinétiques du mouvement de sortie. - Il indique également que les angles de flexion/extension de la hanche et du genou sont des variables pertinentes pour évaluer l'inconfort engendré durant ce mouvement
((Giacomin et Quattrocchio, 1997)	<ul style="list-style-type: none"> - Ils définissent des surfaces dites « d'iso-confort » qui couvrent les différents paramètres véhicules influant le confort des sujets. - Deux paramètres véhicules influent sur le confort d'une manière remarquable, le bavolet et surtout le brancard. - Ils montrent également que la hauteur du siège est à considérer prioritairement pour les personnes de grandes tailles.
(Dufour et Wang, 2005)	<ul style="list-style-type: none"> - Ils définissent la notion de « postures neutres » et quelques critères statiques pour quantifier l'inconfort articulaire. - Ils ont également proposé un critère dynamique (évolue dans le temps) pour quantifier l'inconfort corporel.
(Debril et al., 2007)	<p>Ils associent les efforts inter- segmentaires (calculés par dynamique inverse), les résultats d'un test clinique (réalisé sur machine iso- cinétique) à des réponses subjectives d'une personne âgée présentant des déficiences motrices au niveau du genou droit, pour définir un indice d'inconfort lié au mouvement d'entrée</p>

Tableau 1 7. *Principaux résultats des études ergonomiques du mouvement d'accessibilité.*

L'étude ergonomique du mouvement d'accessibilité présentée dans le tableau 1.7 met en évidence l'influence de certaines parties du véhicule sur les mouvements d'entrée- sortie, comme le bavolet, siège et le brancard. Ces parties sont manifestement à considérer dans une optique de simulation du mouvement.

1.3.6 Conclusion

Cette partie a présenté l'état de l'art concernant l'étude du mouvement d'entrée-sortie dans un véhicule automobile. Peu d'études abordent cette thématique (moins de 20 références à notre connaissance). Les travaux existants étudient plutôt le mouvement de personnes jeunes ne présentant pas de déficience dans leur appareil locomoteur. Cinq études relatives à une population de personnes âgées et/ou ayant des déficiences motrices ont été néanmoins recensées. Ces études concernent principalement l'analyse du mouvement d'accessibilité en vue de proposer des aménagements.

Pour mesurer le mouvement d'accessibilité les chercheurs utilisent trois types de maquettes physiques : le conformateur, le véhicule réel modifié et l'habitacle paramétrable. La transformation d'un véhicule réel permet de sauvegarder au mieux les caractéristiques physiques et favorise donc la production d'un mouvement d'accessibilité réaliste. Les

chercheurs retiennent majoritairement le système optoélectronique à capteurs passifs pour mesurer ce mouvement complexe. Un préambule à l'analyse consiste alors à découper le mouvement complexe d'entrée-sortie du véhicule automobile en plusieurs phases.

Parmi les résultats présentés, on retient que l'adaptation du mouvement nécessite entre 4 et 6 essais et que des différences intra- individuelles existent. Des stratégies ont été également identifiées, certaines d'entre elles sont déterminées à partir de l'analyse d'une partie spécifique du corps humain, à savoir la tête. D'autres, au contraire, font suite à l'observation du mouvement du corps humain dans sa globalité.

Des modèles biomécaniques ont été proposés ils sont tous fondés sur une structure de segments rigides articulés. A nouveau la tête apparaît comme un segment corporel non négligeable, contrairement aux membres supérieurs. Par ailleurs, un découpage du tronc en deux parties apparaît être un minimum. Peu d'études proposent de simuler le mouvement d'entrée-sortie du véhicule automobile. Néanmoins parmi les études existantes, Lempereur (Lempereur, 2006) propose une méthodologie en 4 étapes qui donne de bons résultats. Celle-ci vise à simuler le mouvement d'entrée dans un véhicule de dimensions fixées. Le passage au véhicule variable nécessite de connaître les paramètres influant le plus sur le mouvement. L'étude ergonomique du mouvement d'entrée-sortie répond à cette question en soulignant l'importance de la hauteur du siège, du brancard et du bavolet sur le mouvement d'entrée-sortie.

Ainsi, les études portant sur le mouvement d'accessibilité au véhicule automobile apportent un certain nombre d'informations qui pourront avantageusement être utilisées ultérieurement. Néanmoins, elles montrent aussi les manquent en terme de simulation.

1.4 LES TECHNIQUES DE SIMULATION DES MOUVEMENTS HUMAINS

1.4.1 Introduction

Plusieurs classifications des techniques de génération de mouvements sont répertoriées dans la littérature. Des auteurs parlent de techniques basées sur une approche « cinématique », « dynamique » ou « par modification de mouvements » (Gorce et Vanel, 1997; Multon, 1998; El Hafi et Gorce, 1999; Baerlocher, 2001; Julliard, 2001). Gleicher (Gleicher, 2001) distingue les techniques de « synthèse de mouvement » des techniques de « génération de mouvement ». D'autres auteurs considèrent deux grandes classes : la classe de technique à base de « connaissances sur le mouvement » et la classe de techniques utilisant « des bases de mouvements » (Monnier, 2004 ; Lempereur, 2006 ; Wang, 2008). La dernière classification est retenue dans la présente thèse.

1.4.2 Génération de mouvement à base de connaissances sur le mouvement

Cette classe de méthodes, appelée « Knowledge based », est très séduisante (Wang, 2008). En effet, elle offre de nombreuses possibilités pour générer les mouvements humains. Elle exploite des connaissances acquises à partir des études sur le mouvement pour les appliquer dans la génération d'autres mouvements. Parmi les techniques appartenant à cette classe on peut citer : les techniques à base de cinématique et l'interpolation entre postures clés.

1.4.2.1 Les techniques à base de cinématique

Cette classe de technique est inspirée de la robotique. Deux grandes techniques sont distinguées dans cette classe : les techniques à base de cinématique directe et les techniques à base de cinématique inverse.

• Cinématique directe

Cette technique exploite les connaissances acquises des analyses biomécaniques, sous forme de trajectoires et d'angles articulaires, pour décrire l'évolution du mouvement d'un point de vue géométrique. Le mouvement est souvent défini sous forme de paramètres de haut niveau (la longueur et la fréquence de pas de la marche par exemple). Mathématiquement le problème de simulation par cinématique directe se formule de la façon suivante :

$$X(t) = f(\theta(t)) \quad [1.1]$$

Avec $X(t) = (X_1(t), X_2(t), X_3(t) \dots)$ le vecteur de position des différents points anatomiques du modèle squelettique considéré.

Et $\theta(t) = (\theta_1(t), \theta_2(t), \theta_3(t) \dots)$ le vecteur des angles articulaires donnant l'orientation spatiale de chaque segment corporel par rapport au segment qui lui est directement proximal et par rapport au repère global (repère du monde).

Cette technique permet de générer de nouveaux mouvements, différents des mouvements d'origine. Néanmoins son application nécessite de disposer de grandes connaissances sur le mouvement. D'autre part, l'application de cette technique ne permet pas d'introduire les contraintes sur le mouvement à simuler. Enfin, l'application de la cinématique directe devient complexe pour des longues chaînes (comportant plusieurs degrés de liberté).

• Cinématique inverse

La cinématique inverse, à l'opposé de la cinématique directe, consiste à calculer les angles articulaires nécessaires à la reconstruction des trajectoires définies. Le problème de cinématique inverse se formule mathématiquement par l'équation 1.2 suivante :

$$\dot{\theta}(t) = J^{-1} \dot{X}(t) \quad [1.2]$$

Avec $J_{i,j} = \frac{\partial X_i}{\partial \theta_j}$: la matrice Jacobienne du système (Paul, 1981).

Plusieurs solutions liées à ce problème sont proposées dans la littérature. Les solutions sont classifiées selon plusieurs critères. Korein (Korein, 1985) distinguent les méthodes algébriques, les méthodes géométriques et les méthodes itératives. Tolani et al. (Tolani et al., 2000) distinguent les méthodes analytiques des méthodes numériques. La dernière classification est retenue pour présenter les solutions possibles de l'équation 1.2.

Méthodes analytiques

Ces méthodes sont généralement retenues pour des systèmes à faible redondance et dont le nombre de DDL est réduit. Les solutions analytiques peuvent être trouvées en résolvant un système d'équations non linéaires (Paul, 1981). Korein (Korein, 1985) puis Tolani (Tolani, 1996) et Tolani et al. (Tolani et al., 2000) proposent les solutions analytiques d'une chaîne cinématique ouverte composée de 7 degrés de liberté en tenant compte des butées articulaires. Cette chaîne cinématique est la représentation d'un bras ou d'une jambe. Des liaisons de type rotule représentent respectivement, l'épaule, la hanche, le poignet et la cheville tandis que le coude et le genou sont modélisés chacun par une liaison pivot. Que ce soit pour le bras ou la jambe, le problème est résolu en positionnant le poignet (resp. la cheville) par rapport à l'épaule (resp. la hanche). Ensuite, l'algorithme utilise le degré de liberté supplémentaire pour placer le coude (resp. le genou) aussi près d'une position désirée en évitant les butées articulaires

Cette classe de technique de résolution trouve ces limites quand le système étudié contient plusieurs DDL (>7), dans ce cas les méthodes numériques sont plus appropriées.

Méthodes numériques

Cette classe de techniques propose plusieurs solutions à l'équation 1.2. Il faut noter que la matrice Jacobienne est rarement carrée, ce qui complique sa résolution. Plusieurs solutions sont proposées dans la littérature (inversion de la matrice Jacobienne, la transposée de la Jacobienne,...). L'objectif de ce paragraphe n'est pas d'être exhaustif. Dans la suite, la présentation se limite à la méthode de résolution par la pseudo inverse et la programmation non linéaire, méthodes couramment retenues dans l'animation de mouvements humains.

• Résolution par la pseudo inverse

Soit un système à m DDL et soumis à n contraintes, Moore- Penrose (Moore- Penrose , 1955) assimile l'inversion de la matrice J au calcul de la matrice J^+ , nommée la pseudo inverse, définie comme suit :

$$J^+ = \begin{cases} (J^T J)^{-1} J^T & \text{si le système est sous - contraint } (m > n) \\ J^T (J J^T)^{-1} & \text{si le système est sur - contraint } (m < n) \end{cases}$$

avec J^T la matrice transposée de la matrice J .

La résolution de l'équation 1.3 revient à résoudre l'équation $\dot{\theta}(t) = J^+ \dot{X}(t)$

La matrice pseudo inverse vérifie les propriétés suivantes :

$$J J^+ J = J$$

$$J^+ J J^+ = J^+$$

$$(J^+ J)^T = J^+ J$$

$$(J J^+)^T = J J^+$$

Cette forme de solution, nommée la solution particulière, permet de placer l'effecteur à l'endroit désiré. Cependant, l'emplacement exact de l'effecteur n'est pas le seul objectif au cours d'un mouvement. En effet, d'autres contraintes (éviter d'obstacle, minimisation d'énergie...) liées au mouvement, doivent être considérées. C'est dans ce contexte que Liegeois (Liegeois, 1977) propose une forme plus générale de la pseudo inverse en ajoutant une solution dite homogène à la solution particulière. La solution homogène permet d'intégrer des contraintes liées au mouvement, souvent dites « les tâches secondaires ».

L'équation 1.2 est formulée comme suit :

$$\dot{\theta}(t) = J^+ \dot{X}(t) + (I - J^+ J)Z$$

Avec I : la matrice identité, $Z = \alpha \nabla \phi$ avec $\nabla \phi$ le gradient de la fonction ϕ correspondant à un critère d'optimisation et α une constante de pénalité permettant de gérer la vitesse du critère d'optimisation. Plus α est important, plus vite le critère est optimisé.

Plusieurs critères sont proposés dans la littérature. Parmi les critères considérés, citons l'évitement de collisions (Baillieul, 1986; Nebel, 1999), la minimisation des couples articulaires (Lepoutre, 1993), le maintien de l'équilibre (Boulic et al., 1996), l'éloignement des butées articulaires (Fournier, 1980; Klein et Huang, 1983; Chevallereau et Khalil, 1988) et enfin Baerlocher (Baerlocher, 2001) propose une forme automatique de la matrice Jacobienne qui permet de choisir des contraintes parmi un ensemble de contraintes d'un système et cela selon un ordre de priorité.

L'usage de la pseudo inverse garantit l'existence d'au moins une solution pour un système donné. Cependant, elle ne garantit pas sa stabilité au voisinage de singularités (Press et al., 1992).

• Programmation non linéaire

Certains auteurs proposent de transformer le problème de cinématique inverse en un problème de programmation non linéaire (Welman, 1993; Zhao et Badler, 1994). Ce type de méthode permet de résoudre assez efficacement le problème de cinématique inverse, sans calculer explicitement l'inverse de la matrice Jacobienne. La résolution du problème de cinématique inverse revient à minimiser la fonction écart $E(\theta(t))$ entre la position courante de l'effecteur et une position désirée $X_d(t)$ (Welman, 1993):

$$E(\theta(t)) = [X_d(t) - f(\theta(t))]^2 \quad [1.3]$$

A cette formule, des contraintes, de type inégalité, liées au mouvement peuvent être ajoutées. Pour que l'équation 1.3 s'écrive comme suit :

$$E(\theta(t)) = [X_d(t) - f(\theta(t))]^2$$

S.C. $\theta_{\min} \leq \theta(t) \leq \theta_{\max}$

Les contraintes permettent d'assurer le réalisme des mouvements générés et d'intégrer plusieurs connaissances simultanément sur le mouvement. Plusieurs contraintes sont définies dans la littérature, comme le couplage articulaire des articulations distales et proximales des doigts (Rijpkema et Girard, 1991), le couplage entre les articulations de la hanche et du genou (Kreighbaum et Barthels, 1990). Plusieurs algorithmes d'optimisation (Newton, PRAXIS, Powell, Fletcher, ...) peuvent être utilisés pour résoudre le problème de programmation non linéaire. Chin (Chin, 1996) dresse un état de l'art étendu sur ces techniques qu'ils nomment les techniques numériques.

Parmi les exemples rapportés dans la littérature, Zhao et Badler (Zhao et Badler, 1994) formulent le problème de cinématique inverse sous forme d'un problème d'optimisation non linéaire en considérant plusieurs contraintes afin de générer des mouvements pour des figures virtuelles fortement redondantes. Chin (Chin, 1996) simule le mouvement d'un bras humain en utilisant la programmation non linéaire. Zhang et al. (Zhang et al., 1998) simulent des mouvements d'atteinte à partir d'une posture assise. Farrel et al. (Farrell et al., 2005) considèrent une approche à base d'optimisation pour simuler la coordination posturale d'un système à 30 DDL constitué d'un tronc et des deux bras.

Cette technique est également utilisée dans la résolution de la cinématique des mannequins les plus importants sur le marché comme Jack et Santos (Cf. Annexe A.1.1).

L'usage de cette méthode permet de remédier au problème lié à la redondance articulaire. Cependant, l'inconvénient majeur de cette technique est le risque d'avoir des solutions partielles, correspondant à des minima locaux.

1.4.2.2 Interpolation entre postures clés

Cette technique est utilisée notamment dans l'animation de personnages virtuels. Des mouvements clés, correspondant à des postures clés, réalisés par des êtres humains sont capturés dans un premier temps. Des interpolations sur les paramètres de mouvements entre les différentes postures clés sont réalisées. Les angles articulaires de chaque chaîne cinématique considérée sont représentés par des fonctions continues par morceau. Les valeurs initiales et finales des différents angles sont données, les angles intermédiaires sont calculés par interpolation entre chaque posture clé successive. La technique d'interpolation par des splines est souvent utilisée (Kochanek et Bartels, 1984).

Le choix des mouvements clés et des postures clés nécessitent une grande expertise sur le mouvement humain. Cette technique dépend fortement du talent de l'animateur. Cette technique est souvent utilisée dans la création des films d'animation (Hulk, La haut,...). Elle n'est cependant pas envisageable dans le cadre de la simulation ergonomique.

D'après Wang (Wang, 2008), trois difficultés majeures résident dans l'approche basée sur des connaissances.

- 1) La première concerne l'identification des fonctions de coût.
- 2) La deuxième, concerne la validation de ces fonctions de coût. En effet, les validations rencontrées impliquent peu de segments corporels et se limitent « à la dimensions deux » pour la plupart à ce jour.
- 3) La troisième concerne les algorithmes d'optimisation, qui peuvent être numériquement instables et sont souvent très gourmands en temps de calcul.

Une autre alternative porte sur l'usage de méthodes basées données. Le paragraphe suivant présente cette alternative.

1.4.3 Génération de mouvement à partir d'autres mouvements

Une alternative, appelée « data based », porte sur la génération de mouvements humains à partir d'autres mouvements existants dans des bases de données. Cette approche garantit un certain réalisme, proportionnel à la dimension de la base considérée et des mouvements à générer.

D'après Wang (Wang, 2008), les études faisant appel à l'usage de cette approche passent par trois étapes principales :

1. Constitution d'une base de mouvements : où plusieurs mouvements et leurs caractéristiques sont enregistrés. Des connaissances sur le mouvement à simuler sont également enregistrées dans cette base (stratégies motrices utilisées par les sujets

constituants la base, instants et postures clés du mouvement, contraintes articulaires et environnementales liées au mouvement à simuler...).

2. Extraction d'un mouvement référentiel : cela peut concerner un mouvement type, ou bien un mouvement d'un représentant d'un groupe de gens adoptant la même stratégie.
3. Génération de nouveaux mouvements à partir du mouvement référentiel : cette étape concerne l'application de contraintes sur le mouvement référentiel en vue de l'adapter aux nouvelles conditions dans lesquelles la simulation est souhaitée. Plusieurs techniques sont présentées dans la littérature, voir (Gleicher, 2001) pour une revue plus détaillée.

Cette classe de méthodes de génération de mouvements nécessite également une certaine connaissance sur le mouvement à générer. En effet, la limite entre les deux classes (à base de connaissances et à base de données) n'est pas imperméable (Wang, 2008). Cette approche est utilisée dans la génération de mouvements complexes : El hafi (El Hafi, 2000) pour simuler des mouvements d'enjambement d'obstacles, Wang (Wang, 2002) pour simuler des mouvements de débrayage, Monnier (Monnier, 2004) pour simuler des mouvements de bouclage de la ceinture de sécurité, Lempereur (Lempereur, 2006) pour simuler des mouvements d'entrée dans un véhicule automobile pour des personnes d'anthropométries variables dans un habitacle à dimensions fixes et Bendahan (Bendahan, 2006) pour simuler des mouvements de préhension dans un environnement encombré.

Monnier (Monnier, 2004) classe les techniques de génération de mouvements à base de données en deux grandes classes : les techniques utilisant plusieurs mouvements et les techniques à base de modifications d'un mouvement référentiel. La même classification est adoptée dans la présente étude.

1.4.3.1 Techniques utilisant plusieurs mouvements

Cette classe de méthodes fait appel à l'usage de plusieurs mouvements enregistrés en vue de générer un nouveau mouvement. Parmi les techniques appartenant à cette classe citons, le mélange de mouvements, la régression fonctionnelle et l'adaptation des mouvements à de nouveaux personnages.

• Mélange de mouvements (motion retargetting)

Le mélange de mouvements se fait par des interpolations entre les paramètres de plusieurs mouvements en vue de générer de nouveaux mouvements. Les paramètres des mouvements sont généralement extraits en utilisant des techniques issues du traitement du signal (Bruderlin et Williams, 1995). Unuma et al. (Unuma M., 1995) décomposent le mouvement de la marche dans le domaine fréquentiel en utilisant une série de Fourier afin de produire différentes allures (fatigue, marche rapide...). Bruderlin et Williams (Bruderlin et

Williams, 1995) utilisent une interpolation multi objectifs pour mélanger deux mouvements. Rose et al. (Rose et al., 1996) ont adopté une technique d'interpolation à plusieurs dimensions en vue de mélanger plusieurs mouvements. Witkin et Popovic (Witkin et Popovic, 1995) proposent une technique de mélange de mouvements qu'ils nomment « motion warping ». Monzani et al. (Monzani et al., 2000) utilisent un squelette intermédiaire pour adapter des mouvements à d'autres personnages.

Plusieurs exemples de mélange de mouvements sont rapportés dans la littérature. Souvent les mouvements à mélanger ne sont pas capturés dans les mêmes conditions. A titre d'exemple la figure 1.9 présente le processus de mélange d'un mouvement de marche avec un mouvement de saut. Ce genre de techniques est souvent utilisé en animation où elles trouvent ses limites lorsqu'il s'agit d'assurer une correspondance temporelle entre les différents mouvements à mélanger.



Figure 1 9. Exemple de mélange de mouvements de marche avec un mouvement de saut
(Rose et al., 1996)

• Régression fonctionnelle

Cette technique est introduite par Faraway depuis 1997 (Faraway, 1997). Cette technique est basée sur l'équation fonctionnelle de régression. Plusieurs formes de cette équation sont considérées dans la modélisation et la simulation des mouvements humains. L'application de cette méthode nécessite de larges bases de mouvements.

Le modèle statistique exploité par la méthode est exprimé par l'équation de régression suivante :

$$y(t) = x^T \beta(t) + \varepsilon(t)$$

Avec :

x : est le vecteur des prédictions (taille, anthropométrie, la distance de la cible à atteindre...).

$\beta(t)$: La matrice des coefficients de régression.

$\varepsilon(t)$: Le vecteur représentant l'erreur.

Le vecteur $\beta(t)$ est estimé par une méthode des moindres carrés de la forme $\hat{\beta}(t) = (X^T X)^{-1} X^T y(t)$, avec X un vecteur constitué des éléments x.

Le vecteur $y(t)$ est également estimé par une combinaison linéaire lorsque celui-ci n'est pas observable.

Le modèle est validé en utilisant une large base de données constituée de 8000 mouvements d'atteinte (Faraway et al., 1999; Faraway, 2000). Le modèle est utilisé pour simuler des mouvements d'atteinte (Faraway, 1997; Faraway, 2000), de déplacements de cubes (Faraway et al., 1999) ou encore combinée avec une technique de cinématique inverse pour simuler des mouvements de débrayage (Wang, 2002).

L'approche présente tout de même certains problèmes, elle ne tient pas compte des lois biomécaniques, le problème d'évitement de collision,... et la nature des résultats dépend fortement de la largeur de la base de données considérée.

• Adaptation de mouvements à de nouveaux personnages

Cette méthode consiste à adapter le mouvement d'un squelette à un autre squelette d'anthropométrie différente (Gleicher, 1998). Ce travail peut engendrer des artefacts qu'il faut corriger. Plusieurs contraintes de type spatio- temporelles (Gleicher, 1998) doivent être prises en compte lors de l'adaptation d'un mouvement pour un autre squelette. En effet, des problèmes de glissements, de pénétrations des pieds dans le sol...peuvent se présenter si le mouvement n'est pas correctement adapté à l'autre squelette (Cf. Fig. 1.10).

Plusieurs mouvements de même type sont nécessaires pour adapter le mouvement à un autre squelette. Les paramètres du nouveau squelette sont exprimés en fonction de ceux des squelettes réalisant le même type de mouvement. Lee et Shin (Lee et Shin, 1999) proposent une adaptation du mouvement à un autre personnage à partir d'un mouvement de la base en décomposant chaque angle articulaire en des splines hiérarchiques. Pronost (Pronost, 2006) interpole plusieurs mouvements de leur base de données en fonction des paramètres anatomiques pour adapter des mouvements de marche pour des nouvelles créatures.

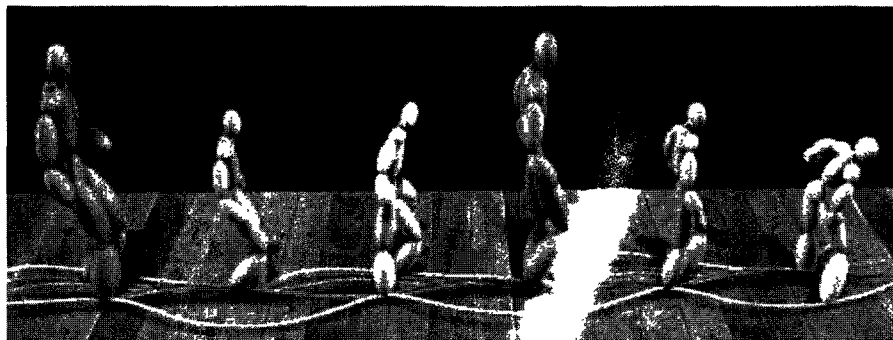


Figure 1 10. Mise en évidence de la nécessité à adapter le mouvement en fonction des paramètres du nouveau squelette (Gleicher, 1998).

1.4.3.2 Techniques à base de modifications d'un mouvement

Contrairement à la classe de méthodes utilisant plusieurs mouvements pour produire un autre mouvement, cette classe ne considère qu'un seul mouvement de la base (mouvement référentiel) qui va subir des modifications de sorte à en produire un nouveau. Parmi les techniques de cette classe, on peut citer : l'adaptation de mouvements à l'environnement et le « space time optimization ».

• Adaptation de mouvements à l'environnement

Cette technique consiste à modifier un mouvement référentiel, sans pour autant changer sa nature, capturé sous certaines conditions, de sorte à l'adapter à d'autres environnements. Cette technique prend en considération les nouvelles contraintes liées au nouvel environnement.

Des connaissances sont extraites du mouvement référentiel et utilisées lors de la génération du nouveau mouvement. Afin de respecter les différentes contraintes liées au nouvel environnement, des programmes de cinématique inverse sont utilisés pour calculer les angles articulaires permettant de respecter au mieux les nouvelles contraintes.

Gorce (Gorce, 1999) simule le contrôle postural sous différentes perturbations externes, El Hafi et Gorce (El Hafi et Gorce, 1999) simule le mouvement d'enjambement d'un obstacle en considérant la hauteur et la position du sujet par rapport à l'obstacle, Bendahan (Bendahan, 2006) simule un mouvement de préhension dans un environnement encombré en considérant plusieurs hauteurs de l'obstacle, en utilisant un réseau de neurones. Park et al. (Park et al., 2003) proposent un concept de Programme Moteur Généralisé (GMP) qui véhicule l'idée que l'être humain enregistre des mouvements dans sa mémoire pour pouvoir en faire appel et les adapter aux nouveaux environnements.

Ces techniques présentent des contraintes sur le mouvement global et non pas à chaque instant.

• Space time optimization

Cette technique est introduite par Witkin et Kass (Witkin, 1988) afin de générer des mouvements optimaux respectant différentes contraintes. Cette méthode traite les contraintes liées au mouvement tout au long de la durée du mouvement et à chaque pas de temps considéré. Cette méthode transforme le problème de génération de mouvements en un problème de cinématique inverse à base de programmation non linéaire avec contraintes (Cf. § 1.4.2.1). La forte non linéarité considérée dans cette méthode rend sa résolution pas toujours évidente. Une solution pratique consiste à réduire l'espace de trajectoires possibles de sorte à ne prendre que les trajectoires qui peuvent être représentées par des combinaisons linéaires de fonctions de bases comme les B-Splines ou bien les Ondelettes.

Parmi les auteurs ayant utilisé cette technique, Cohen (Cohen, 1992) développe un système de commande spatio- temporelle qui permet à l'utilisateur de guider le processus d'optimisation de sorte à trouver les mouvements faisables en temps réel. Lempereur (Lempereur, 2006) calcule les angles articulaires d'un mouvement d'entrée d'un autre personnage dans un véhicule automobile en considérant un problème d'optimisation non linéaire.

L'avantage de cette technique est qu'elle assure le réalisme des mouvements générés grâce à la fonction objectif qui essaie de conserver une bonne qualité de l'animation de départ, conjointement au respect des contraintes. Son inconvénient majeur est qu'il n'est pas toujours possible de formuler les différentes contraintes et encore faut il trouver un algorithme optimale pour résoudre le problème d'optimisation non linéaire.

1.4.4 Conclusion

Une panoplie de techniques de génération de mouvements remarquées dans la littérature est présentée. Les techniques sont réparties en deux grands groupes : les techniques de génération de mouvements à base de connaissances sur le mouvement et les techniques exploitants des bases de mouvements.

Les techniques de génération de mouvement à base de connaissances, comme le nom l'indique, demandent une grande expertise du mouvement. Elles semblent difficilement envisageables lorsque l'objectif est la simulation de mouvement tridimensionnel complexe comme l'accessibilité automobile.

Les techniques à base de mouvements génèrent de nouveaux mouvements en utilisant des mouvements appartenant à une base de données. Deux grandes classes regroupant ces méthodes sont distinguées : la classe de méthodes utilisant plusieurs mouvements de la base de données pour générer un nouveau mouvement (mélange de mouvement, régression fonctionnelle et adaptation à un nouveau personnage) et la classe de méthodes utilisant un seul mouvement dit « mouvement référentiel » (adaptation à un nouveau environnement et spacetime optimization). Les méthodes de la première classe semblent plutôt être retenues lorsque l'objectif est l'animation. Au contraire, les méthodes utilisant un mouvement de référence sont couramment retenues pour simuler le mouvement humain. Plus particulièrement, la méthode dite de « spacetime optimization » semble être plus intéressante pour simuler des mouvements tridimensionnels avec contraintes comme le mouvement d'entrée dans un véhicule automobile.

Ce paragraphe a montré, pour notre problématique, l'intérêt des techniques de simulation à base de données, par rapport à celles à base de connaissances. La partie suivante présente les différentes étapes menant à la construction d'une base de mouvements, qui apparaît donc une étape indispensable avant la simulation.

1.5 CONSTRUCTION D'UNE BASE DE MOUVEMENTS POUR LA SIMULATION

1.5.1 Introduction

Les paragraphes suivants explicitent les étapes classiquement utilisées dans la littérature pour construire une base de mouvements. Un premier paragraphe présente les outils de mesures de la cinématique des mouvements humains. Un seconde paragraphe présente les outils issus de la biomécanique et utilisés dans la structuration de la connaissance issue de la mesures du mouvement humain. Enfin un troisième paragraphe présente certaines techniques utilisées dans le calcul des angles articulaires à partir de la mesure des mouvements humains.

1.5.2 Outils de mesures de la cinématique du mouvement humain

Plusieurs types d'outils de mesures de la cinématique sont principalement rencontrés dans la littérature : les goniomètres, les accéléromètres, les systèmes de mesures inertiels et les divers systèmes dits de "capture de mouvements". Nous limiterons notre présentation à ces derniers qui sont les plus utilisés dans ce type d'étude.

1.5.2.1 Systèmes de capture du mouvement

Deux grandes familles de systèmes de capture du mouvement existent, les systèmes à base de champs magnétiques et les systèmes optoélectroniques. Ces deux types de systèmes déterminent les positions 3D des capteurs placés sur des points anatomiques du corps du sujet.

• Systèmes magnétiques

Les systèmes magnétiques utilisent un émetteur et plusieurs récepteurs. L'émetteur génère trois champs magnétiques dans son voisinage selon trois axes orthogonaux. Chaque récepteur possède trois bobines orthogonales qui leur permettent de mesurer le champ induit par chaque bobine. Ces récepteurs sont placés sur le corps du sujet et délivrent leurs positions et leurs orientations. Ces récepteurs sont reliés par des fils à l'émetteur (Molet, 1998).

L'usage des systèmes magnétiques nécessite l'ajout d'une phase de traitement pour retrouver les centres articulaires (Ménardais, 2003). Cependant, certains auteurs proposent des modules de calcul automatique permettant de passer directement des données brutes capturées par le système magnétique aux données exploitables (angles articulaires). Dans ce contexte O'brien et al. (O'brien et al., 2000) proposent une méthode automatique leur permettant d'estimer les paramètres articulaires (centre articulaire, axe de rotation) et segmentaires (longueurs segmentaires) d'un système poly- articulé.

L'avantage des systèmes magnétiques est de fournir directement la position et l'orientation des récepteurs. Ils ne souffrent pas de problèmes d'occultations des récepteurs. Néanmoins, l'alimentation des récepteurs par des fils peut gêner le sujet dans l'exécution de

son mouvement et la zone d'acquisition reste assez faible. Enfin, cette technique est sensible à la présence de métaux dans l'environnement expérimental.

• Systeme optoelectronique

L'ancêtre des systèmes optoélectroniques est apparu vers la fin du XIX^{ème} siècle suite aux travaux de Marey et Demeny (Marey et Demeny, 1885) sur la chronophotographie. C'est à partir de 1895 que Braun et Fisher réalisent la première analyse tridimensionnelle du mouvement (Allard et Blanche, 2000). Il faut attendre l'évolution technologique du XX^{ème} siècle (1980) pour que les premiers systèmes optoélectroniques soient commercialisés. Aujourd'hui les systèmes optoélectroniques ont pris des formes plus évoluées et utilisent plusieurs caméras (plus de 20 parfois). Ces systèmes utilisent le principe de la stéréovision, où chaque capteur doit être vu par au moins deux caméras. Deux catégories de systèmes existent, les systèmes utilisant :

- des capteurs actifs : Ils utilisent des LEDs (Light Emitting Diod). Ces dernières émettent de la lumière infrarouge, qui est captée par des caméras (ex. SELSPOT®, OPTOTRACK®). Ces systèmes présentent des vitesses d'acquisition pouvant atteindre 300 Hz et des erreurs de l'ordre de 0.1 mm. L'inconvénient de ces systèmes est que les LEDs nécessitent des fils qui peuvent gêner la mobilité des sujets.
- des capteurs passifs : ces systèmes utilisent des petites boules recouvertes de scotch lite (appelées marqueurs) qui réfléchissent la lumière infrarouge, émise par une source, vers des caméras CCD dans le même angle d'incidence de la lumière. La capture de mouvements peut être effectuée à des fréquences allant de 50 à 240 Hz. L'erreur « théorique » de ces systèmes est de l'ordre de 1 mm. Parmi les exemples de ces systèmes, citons VICON®, MOTION ANALYSIS®, ELITE®. Théoriquement ils permettent la capture d'un nombre illimité de marqueurs apposés sur la peau d'un sujet. En pratique, au-delà d'un certain nombre de marqueurs, la mobilité des sujets devient contrainte. Le souci majeur de ces systèmes est qu'ils sont sujets à des erreurs de type instrumentale et expérimentale (Cappozzo et al., 1996).

1.5.3 Les erreurs de mesures des systèmes optoélectroniques

1.5.3.1 Les erreurs instrumentales

Ce type d'erreur est essentiellement issu de la résolution des caméras et de la mauvaise exploitation du système (qualité de calibration, volume considéré dans la calibration...). Richards (Richards, 1999) compare plusieurs systèmes optoélectroniques et montre que ces derniers présentent des précisions raisonnables et incluses dans des marges d'erreurs admissibles pour l'étude des mouvements. Roux (Roux, 2002) parle d'une précision du

système VICON® égale à $D/3891$, avec D étant la plus grande distance entre deux points du volume de mesure.

1.5.3.2 Les erreurs expérimentales

Trois types d'erreurs existent dans cette catégorie : les erreurs liées à l'expérimentateur (Gorton et al., 2001), les erreurs causées par la perte de marqueurs par occultation (surviennent lorsqu'un marqueur n'est vu que par une seule caméra, voire par aucune) et les erreurs causées par les glissements de marqueurs sur la peau, qui surviennent surtout lorsque les marqueurs sont positionnés sur des parties molles, induisant ainsi des déformations (parfois considérables) sur les données mesurées (longueurs segmentaires, angles articulaires...) (Cappozo et al., 1996).

1.5.3.3 Correction des erreurs

Plusieurs études dans la littérature proposent de remédier à l'effet des différents aléas cités dans le paragraphe 1.5.3.2.

• Corriger la perte des marqueurs

Plusieurs auteurs dans la littérature proposent des méthodes pour remédier au problème de la perte de marqueurs. Le tableau 1.8 présente des exemples de ces méthodes.

Etude	Méthode
(Ménardais et Multon, 2001)	Interpoler les courbes construites avec les distances entre les marqueurs disponibles et les marqueurs masqués, pour retrouver les trajectoires de ces derniers.
(Herda et al., 2001)	Utilisent un modèle squelettique du corps humain afin d'estimer la position des marqueurs occultés au cours du mouvement
(Gillet, 2004)	Expression de la position d'un marqueur occulté dans un repère construit par des marqueurs voisins. Il utilise la pré expérimentation pour calculer la position du marqueur occulté dans ce repère.
(Liu et Mcmillan, 2006)	<ul style="list-style-type: none"> - Définir des modèles linéaires locaux issus d'un apprentissage de trajectoires à base de composantes principales. - Calculer les trajectoires des marqueurs occultés, en utilisant un classificateur entraîné afin d'identifier le modèle linéaire local le plus approprié pour chaque pas de temps. - Calculer la trajectoire du marqueur occulté en utilisant une solution aux moindres carrés basée sur la trajectoire de marqueurs disponibles (non occulté) et des composantes principales du modèle considéré.

Tableau 1 8. *Quelques études proposant de remédier au problème de la perte de marqueurs.*

D'une façon générale, la mise en œuvre de ces procédures semble être compliquée compte tenu qu'elles nécessitent plusieurs étapes engendrant des calculs « compliqués » (réseaux de neurones...). Par contre, la mise en œuvre de la méthode proposée par Gillet

(Gillet, 2004) semble être simple, de plus son application au mouvement d'accessibilité donne de bons résultats (Lempereur, 2006).

• *Corriger les glissements de peau*

Les erreurs les plus importantes sont celles liées aux glissements de la peau. D'après Cappozzo et al. (Cappozzo et al., 1996), des erreurs d'environ 40 mm peuvent être obtenues sur les marqueurs apposés sur les membres inférieurs. Beaucoup de travaux portant sur la correction de l'effet de glissement de peau sont rapportés dans la littérature.

Le tableau 1.9 présente des exemples d'études rapportées dans la littérature et qui proposent de remédier à ce problème.

Etude	Méthode	Remarque
(Cheze, 1993)	Solidification, basée sur l'hypothèse que les marqueurs appartiennent à des segments solides, pour réduire l'effet des masses molles.	Cette méthode donne des résultats satisfaisants, cependant elle ne permet pas de tenir en compte de la structure physiologique humaine.
(Faraway et al., 1999)	Rectifier les angles articulaires issus de l'expérimentation de sorte que les différents points anatomiques (sur lesquels les marqueurs sont apposés) se positionnent au mieux où ils sont supposés se positionner.	La mise en œuvre de cette méthode nécessite la définition d'un modèle de régression.
(Schmidt et al., 1999)	Corriger l'effet de glissement des marqueurs en considérant une connaissance a priori sur les mouvements plausibles qui peuvent être réalisés par l'articulation.	Cette technique ne permet pas de tenir compte de la structure physiologique humaine.
(Lu et O'connor, 1999)	Minimiser la somme quadratique des distances entre les trajectoires mesurées et celles obtenues via le modèle retenu pour représenter l'homme. Le programme d'optimisation considère une matrice de coefficients de pondération	Les seules contraintes considérées dans la méthode d'optimisation sont issues du modèle de l'homme.
(Alexander et Andriacchi, 2001)	Modéliser le déplacement de la peau par une fonctionne à laquelle un modèle du bruit est ajouté	Le choix d'un modèle suffisant de bruit n'est toujours évident.
(Roux, 2002)	S'inspire de la méthode de Lu et O'connor (Lu et O'connor, 1999) à laquelle des contraintes sont ajoutées.	Appliquée uniquement pour le membre supérieur.
(Lempereur et al., 2003)	Adapter les angles articulaires calculés, à partir de l'expérimentation, de sorte que les mouvements reconstruits des effecteurs (les pieds) suivent au mieux les trajectoires mesurées (issues de l'expérimentation).	La méthode donne de bons résultats sur les effecteurs (bouts de pied), néanmoins, elle est peu efficace pour les autres trajectoires (Ait El Menceur et al., 2008b).
(Cerveri et al., 2005)	Méthode dénommée LME (Locale Motion Estimation). La méthode consiste à estimer les variables cinématiques à partir des images en 2D en utilisant un modèle de l'homme et un filtre de Kalman.	La mise en œuvre de cette méthode nécessite plusieurs étapes et fait appel à plusieurs outils.

Tableau 1 9. *Synthèse d'études proposant de remédier au problème de glissements de peau par optimisation.*

Au vu des résultats de l'étude bibliographique rapportée dans le tableau 1.9, les méthodes à base d'optimisation apparaissent les mieux adaptées pour remédier au problème de glissement de peau. Elles permettent de rectifier les trajectoires bruitées tout en considérant la structure physiologique humaine.

• Correction du bruit de mesure

Enfin, pour remédier au problème du bruit, des filtres passe bas, de type Butterworth sont conseillés dans la littérature (Allard et Blanche, 2000). Ces filtres permettent d'éliminer certaines parties du signal bruité. Cependant, leur utilisation peut engendrer également une perte d'informations et un déphasage. Ce dernier peut être éliminé par un filtrage inversé. Il est à noter également que certains systèmes optoélectroniques (ex. VICON®) offrent la possibilité d'effectuer des interpolations linéaires ou via des splines pour remédier aux pertes de marqueurs, lorsque celles-ci ne dépassent pas quelques images.

1.5.4 Apport de la biomécanique

1.5.4.1 Modélisation biomécanique

L'homme, avec sa structure corporelle complexe de plus de deux cents degrés de libertés (Barin, 1989) est modélisé en biomécanique « à tous les niveaux » (Cf. Fig. 1.12). Selon les applications, les modèles diffèrent et les niveaux de modélisation également. Plusieurs classifications des modèles biomécaniques figurent dans la littérature. Pudlo (Pudlo, 1999) considère trois approches de modélisation en biomécanique (Cf. Fig. 1.11) : 1) l'approche balistique, 2) l'approche squelettique et 3) l'approche musculo-squelettique.

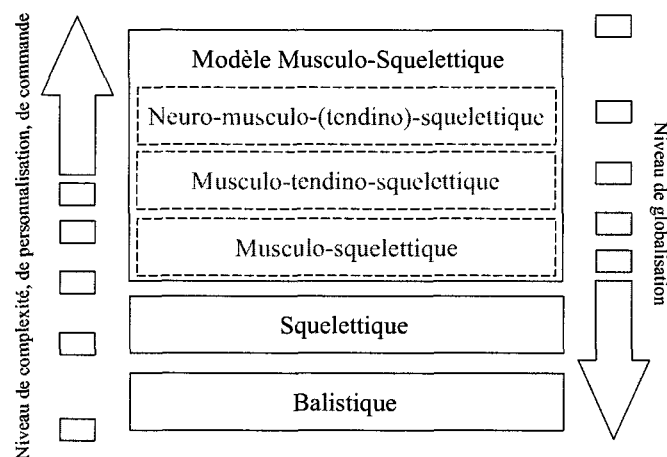


Figure 1 11. *Classification des modèles utilisés en biomécanique (Pudlo, 1999)*

• Dans l'approche balistique, le modèle de l'homme est réduit à celui de son centre de masse. Par conséquent les évolutions articulaires ne sont pas représentées par ce type de

modèle. Ce genre de modèles ne tient pas compte de la représentation tridimensionnelle des mouvements humains. On retrouve ce genre de modèles dans des études liées à certaines activités sportives (saut en hauteur, saut en longueur, lancer du disque...).

- L'approche squelettique modélise l'homme par des corps rigides (représentant les segments corporels) reliés entre eux par des articulations caractérisées par 1 à 3 degrés de liberté en rotation. Cette représentation correspond à faire l'hypothèse que les articulations sont "sans glissement". Cette hypothèse simplificatrice est une des sources d'erreur dans la simulation de mouvement effectuée à partir de mouvements réels enregistrés. Certaines études adoptant cette approche considèrent la globalité du corps (Gorce et al., 1995; Pudlo, 1999; El Hafi, 2000; Begon, 2006) ou bien des parties bien spécifiques comme les membres inférieurs (Karabinova Makki, 1999; Lempereur, 2006), les membres supérieurs (Gorce et al., 1994; Chèze et al., 1996; San Marcelino, 1996; Fradet, 2003; Bendahan, 2006) ou encore le rachis (Godillon, 1991; Besson, 1999; Pradon, 2004).

- Dans l'approche musculo-squelettique, des niveaux plus détaillés sont considérés, comme les muscles, le système nerveux central (SNC)... En plus du modèle squelettique, une couche musculaire (parfois neuromusculaire) est considérée pour augmenter le degré de détail du modèle considéré. Cette classe de modèles intègre l'aspect commande issu du système nerveux central (Kuo, 1995). Compte tenu de leur complexité, ces modèles ne sont retenus que pour représenter des parties du corps humain comme les membres inférieurs (Lister et al., 2006).

Le choix d'un modèle est dépendant des objectifs de l'étude, de l'application considérée, mais aussi de la capacité à maîtriser les différentes disciplines scientifiques (ex. automatique, mécanique, physiologie, neurophysiologie), cette dernière trouvant sa solution dans l'implication d'acteurs d'horizons divers (Hatze, 1984). Ainsi, réduire le corps humain à un point pour générer le mouvement d'entrée dans un véhicule automobile est réducteur et d'autre part, vouloir déterminer un modèle du corps humain dans sa globalité sous la forme musculo- squelettique relève de l'utopie. Les paragraphes suivants se focalisent donc sur le modèle squelettique.

1.5.4.2 Classification des modèles squelettiques

Gorce (Gorce, 2000) distingue 3 classes de modèles squelettiques : 1) le modèle plan en chaîne ouverte, 2) le modèle plan arborescent et 3) le modèle tridimensionnel (Cf. Fig. 1.12).

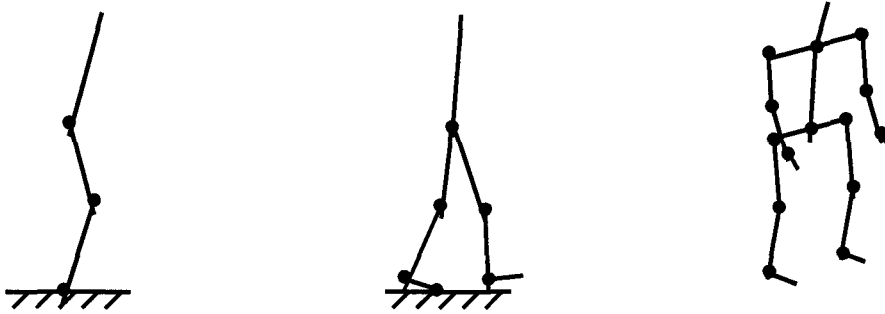


Figure 1 12. *Modèles plans chaînes ouvertes, arborescents et tridimensionnels (Gorce, 2000).*

Les modèles plans en chaîne ouverte ou arborescents permettent la représentation du système squelettique de l'homme dans un plan particulier : le plan sagittal* ou le plan frontal*. Les modèles tridimensionnels considèrent l'homme dans les 3 plans (plan sagittal*, frontal* et horizontal*) et sont plus commodes pour étudier des mouvements complexes tels que l'accessibilité automobile. Des exemples des trois types de modèles squelettiques sont rapportés dans les travaux de El Hafi (El Hafi, 2000) et Lempereur (Lempereur, 2006).

1.5.4.3 Description des modèles squelettiques

Des notions de robotique sont généralement utilisées dans la description des modèles squelettiques polyarticulés et tridimensionnels. Parmi les différentes conventions de représentation de chaînes articulaires, la convention de Denavit et Hartenberg (Denavit et Hartenberg, 1955) est souvent retenue pour représenter des modèles du corps entier ou bien des parties constituées de chaînes cinématiques ouvertes. Selon Khalil et Dombre (Khalil et Dombre, 1999), cette convention est la mieux adaptée notamment pour représenter les chaînes simples et ouvertes. Parmi les auteurs qui ont fait usage de cette convention, citons Gorce et al. (Gorce et al., 1994) pour la modélisation de la saisie d'objet en situation dynamique, pour le maintien dynamique de la posture debout sans perturbation, San Marcelino (San Marcelino, 1996) pour modéliser le membre supérieur en situation dynamique, Chèze et al. (Chèze et al., 1996) pour la modélisation du membre supérieur, Karabinova Makki (Karabinova Makki, 1999) pour la modélisation du membre inférieur, Besson (Besson, 1999) pour étudier la cinématique directe et inverse du dos et du cou, Rezzoug (Rezzoug, 2000) pour la modélisation de la main, Yang et al. (Yang et al., 2004a) ont adopté cette convention pour représenter le modèle géométrique directe du membre supérieur lors de la simulation du mouvement de ce dernier, Lempereur (Lempereur, 2006) utilise la convention de Denavit et Hartenberg (Denavit et Hartenberg, 1955) afin de représenter les paramètres de son modèle géométrique, constitué des deux membres inférieurs et du tronc, conçu pour étudier le mouvement d'entrée dans un véhicule automobile.

La convention de Denavit et Hartenberg est également utilisée pour représenter les paramètres de certains mannequins numériques. Verriest et al. (Verriest, 1991) utilisent la

convention de Denavit et Hartenberg (Denavit et Hartenberg, 1995) dans le processus de modélisation du mannequin MAN3D (Cf. Annexe A.1.1). Abdel-Malek et al. (Abdel-Malek et al., 2006) font également appel à l'usage de cette convention dans la modélisation du mannequin SANTOS (Cf. Annexe A.1.1).

Les modèles squelettiques sont inspirés de l'anatomie du corps humain. Le prochain paragraphe présente succinctement des rappels concernant l'anatomie du tronc et des membres inférieurs.

1.5.4.4 De l'être humain au modèle squelettique : les paramètres anatomiques

• Le tronc

Le tronc est constitué du rachis, du pelvis et de la cage thoracique. Seuls le rachis et le pelvis sont présentés par la suite.

Le Rachis

Le rachis (ou la colonne vertébrale) est constitué de 33 ou 34 os (ou vertèbres) dont neuf ont fusionné, pendant la croissance, pour donner deux os distincts : le sacrum et le coccyx (Cf. Fig. 1.13). On dénombre 24 vertèbres séparées par des disques intervertébraux. Le rachis se constitue de cinq parties différentes, cervicales (C1 à C8), thoraciques (T1 à T12), lombaires (L1 à L5), sacrales (S1 à S5) et le coccyx (Kapandji, 1975; Calais-Germain, 1984).

Malgré le nombre important de vertèbres, la mobilité entre deux vertèbres est faible. C'est seulement la somme de chaque jeu articulaire qui permet la mobilité générale du rachis. Le mouvement intervertébral est à six degrés de liberté, trois rotations et trois translations (Godillon, 1991). Le rachis permet donc les mouvements de flexion extension, d'inflexion latérale et de rotation (Kapandji, 1975).

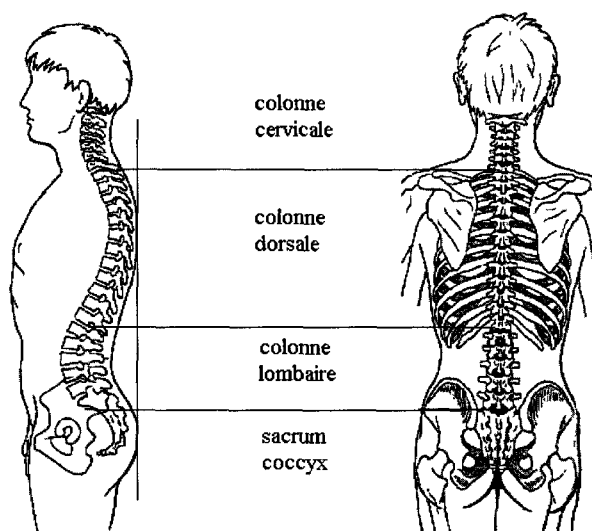


Figure 1 13. Colonne vertébrale (Kapandji, 1975)

Le tableau 1.10 synthétise les amplitudes articulaires des différentes parties du rachis ainsi que le rachis complet.

Zone vertébrale	Flexion/Extension (°)	Rotations (°)	Inflexion latérale(°)
Rachis Lombaire	35-60	5	20
Rachis Dorsal	60-105	35	20
Rachis Cervical	40-75	40 à 50	35 à 45
Rachis Complet	110-140	90	75 à 85

Tableau 1 10. *Amplitudes globales en flexion extension, rotation et d'inflexion latérale du rachis (Pradon, 2004).*

Selon les études, des modèles du rachis plus ou moins exhaustifs sont présentés dans la littérature, proposant des modélisations par un seul segment à des modélisations à plusieurs segments ou bien en éléments finis (Delerba, 2001; Pomero, 2002). Notons que certaines études ne considèrent que des parties spécifiques du tronc. Ci-après sont présentés quelques modèles rapportés dans la littérature et qui traitent les modélisations segmentaires du rachis.

Modèles considérant la globalité du tronc

Gilad et Tichauer (Gilad et Tichauer, 1999) proposent un modèle à quatre segments (tête-C4, C4-T5, T5-L5 et L5-Sacrum) pour étudier les changements de la géométrie du dos lors d'une tâche de soulèvement de charge. Besson (Besson, 1999) partitionne le tronc en cinq segments, trois d'entre eux ont une existence anatomique (Bassin, thorax et la tête) et les deux autres sont déterminés expérimentalement (le segment intermédiaire du dos situé entre le bassin et le thorax, ainsi que le segment intermédiaire du cou situé entre la tête et le thorax). Frigo et al. (Frigo et al., 2003) dans le cadre d'une étude destinée à la détermination des mouvements segmentaires des parties supérieures des jeunes filles lors de la marche à pieds nus, segmentent le dos en sept segments. Arjmand et Shizari-Adl (Arjmand et Shirazi-Adl, 2006) proposent également un modèle du dos à sept segments. Le modèle du dos le plus exhaustif, trouvé dans la littérature, semble celui de Pradon (Pradon, 2004). Celui-ci segmente le dos en neuf corps rigides. Pour étudier l'accessibilité automobile, Lempereur et al. (Lempereur et al., 2004) modélisent le tronc par un seul segment, qu'ils modifient par la suite par un autre modèle à deux segments déterminé par une procédure itérative de calcul. Ils recommandent de partitionner le tronc au moins en deux parties pour tenir compte de la flexibilité de cette partie du corps lors de ce mouvement.

Modèles considérant certaines parties du tronc

La majorité de ces modèles ciblent des parties bien spécifiques du tronc. Lee et al. (Lee et al., 1995) afin de concevoir un modèle prédictif de la mobilité inter segmentaire du rachis lombaire dans le plan sagittal, considèrent la totalité des vertèbres lombaires.

Le Bassin

Le bassin (pelvis) se compose de deux os iliaques, du sacrum et du coccyx. L'os iliaque se compose de trois parties : le pubis, l'ilion et l'ischion (Cf. figure 1.14). Pris dans son ensemble, au regard de ses mobilités et de son rôle dans la stabilité du tronc, le bassin peut être considéré comme une vertèbre supplémentaire, la vertèbre pelvienne.



Figure 1 14. *Représentation du bassin (pelvis).*

• Les membres inférieurs

Chaque membre inférieur est constitué de 3 segments (la cuisse, la jambe et le pied) reliés par 3 articulations : la hanche, le genou et la cheville.

La hanche

La hanche ou l'articulation coxo-fémorale est l'articulation proximale du membre inférieur qui relie la cuisse au bassin (Kapandji, 1974; Calais-Germain, 1984). Les mouvements possibles de la hanche sont la flexion-extension, l'abduction-adduction et la rotation interne-externe. L'amplitude de la flexion et de l'extension de la hanche est conditionnée par la position du genou. Lorsque le genou est étendu, la flexion n'est que de 90° tandis que lorsque le genou est fléchi, elle est de 120°. L'extension est de 20° si le genou est étendu et de 10° lorsque le genou est fléchi. Les amplitudes maximales de l'abduction-adduction sont respectivement de 45° et de 30°. La rotation interne de la hanche varie entre 30° et 40° tandis que rotation externe atteint 60°.

Dans la littérature, la hanche est souvent modélisée par 3 degrés de liberté (Gorce et Vanel, 1997; Pandy et Anderson, 1998; Karabinova Makki, 1999).

Le genou

Le genou est l'articulation intermédiaire du membre inférieur qui relie la cuisse à la jambe (Kapandji, 1974; Calais-Germain, 1984). D'un point de vue physiologique, cette articulation comporte plusieurs degrés de liberté : 1 degré de liberté en flexion –extension, une rotation interne-externe lorsque le genou est fléchi ainsi que les glissements ou translations qui se conjuguent avec les rotations et qui peuvent atteindre plusieurs centimètres. La flexion atteint 140° si la hanche est fléchie au préalable sinon 120° si la hanche est en

extension. L'extension dépasse rarement 0° . La rotation externe et interne présente respectivement une variation angulaire de 40° et de 30° .

Le genou est modélisé (le plus souvent) par deux degrés de liberté représentant les mouvements de flexion-extension et de rotation interne-externe (Vanel et Gorce, 1997 ; Karabinova Makki, 1999 ; Lempereur, 2006).

La cheville

La cheville est l'articulation distale du membre inférieur (Kapandji, 1974 ; Calais-Germain, 1984). Elle conditionne les mouvements de la jambe par rapport au pied. L'amplitude de la flexion est de 20° à 30° . L'extension est plus importante et peut atteindre 30° à 50° . En plus des mouvements de flexion/extension, le pied peut effectuer des mouvements d'abduction/adduction d'amplitude de 35° à 45° .

La cheville est généralement modélisée par deux degrés de liberté représentant les mouvements de flexion/extension et d'abduction/adduction (Pandy et Anderson, 1998 ; El Hafi et Gorce, 1999 ; Gorce, 1999 ; Karabinova Makki, 1999 ; Lempereur, 2006).

1.5.4.5 Détermination des centres articulaires pour les modèles squelettiques

L'estimation des centres articulaires est utile pour calculer les longueurs segmentaires. Malheureusement, les systèmes optoélectroniques ne capturent pas les positions des centres articulaires. Plusieurs auteurs proposent des techniques pour estimer les centres articulaires.

• La hanche

Deux approches d'estimation de la position du centre articulaire de la hanche sont considérées dans la littérature : l'approche à base d'équations de régression et l'approche utilisant la méthode fonctionnelle (sphere fitting) (Wu et al., 2002).

Les équations de régression couramment utilisées par la communauté biomécanicienne sont celles de (Bell et al., 1990; Davis et al., 1991; Seidel et al., 1995). Bush et Gotowski (Bush et Gutowski, 2003) s'inspirent de la méthode de Seidel et al. (Seidel et al., 1995) pour calculer le centre articulaire de hanche en position assise.

La méthode du "sphere fitting" permet d'estimer le centre de la hanche comme étant le centre de rotation d'une sphère décrite par des marqueurs apposés sur la cuisse durant des mouvements de rotation (Leardini et al., 1999; Piazza et al., 2001; Piazza et al., 2004; Camomilla et al., 2006). Plusieurs algorithmes existent comme ceux de Gamage et Lasenbly (Gamage et Lasenby, 2002) ou Halvorsen et al. (Halvorsen et al., 1999) pour estimer le centre articulaire. Dans les travaux de Gamage et Lasenbly (Gamage et Lasenby, 2002), les auteurs supposent que les marqueurs durant les mouvements de rotation sont à une distance constante du centre de rotation. La méthode proposée par Halvorsen et al. (Halvorsen et al., 1999) repose sur une relation géométrique entre la position des marqueurs sur la cuisse à deux

instants différents. La droite passant par le même marqueur à deux instants différents est perpendiculaire à la droite passant par le centre articulaire et le milieu des deux points.

(Leardini et al., 1999) montrent que pour les méthodes de prédiction par les équations de régression l'erreur varie entre 25 et 30 mm tandis qu'avec la méthode fonctionnelle l'erreur est de 13 mm en moyenne.

• Le genou et la cheville

Le centre articulaire du genou est estimé au milieu du segment défini par le condyle interne et externe (Cf. Fig. 1.15). Le centre articulaire de la cheville est également estimé au milieu du segment défini par la malléole interne et externe (Cf. Fig. 1.15). Plus de détails concernant ces méthodes peuvent être lus dans (Cappozzo et al., 1995).

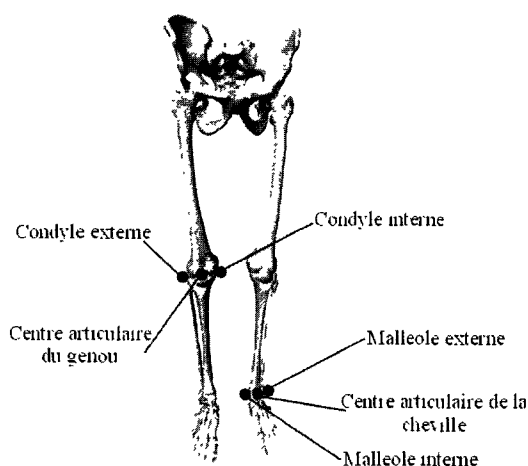


Figure 1 15. Centre articulaire du genou et de la cheville (Lempereur, 2006)

1.5.4.6 Calcul des angles articulaires en biomécanique

Pour quantifier l'orientation spatiale d'un corps par rapport à un autre corps et par rapport au repère du monde, la biomécanique dispose de plusieurs techniques. Certaines de ces techniques sont empruntées à la mécanique pour calculer les angles articulaires des différents segments corporels, utiles pour quantifier la mobilité des différents corps. Dans la suite de ce paragraphe sont présentées quelques techniques de calcul d'angles articulaires en biomécanique.

• Angles d'Euler et de Cardan (Khalil et Dombre, 1999; Sciavico et Siciliano, 2001)

Les angles d'Euler, de Cardan (appelés aussi angles de Bryant) sont issus d'un même principe qui se base sur le fait que l'orientation d'un corps dans l'espace, peut être exprimée par trois rotations planes successives suivant les axes d'un repère orthonormé donné.

Soient les angles ζ , ϑ et ψ . La rotation d'un solide autour d'un axe par l'un des angles précédent se fait, successivement, par les matrices suivantes :

$$R_{\zeta} = \begin{bmatrix} \cos(\zeta) & -\sin(\zeta) & 0 \\ \sin(\zeta) & \cos(\zeta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, R_{\vartheta} = \begin{bmatrix} \cos(\vartheta) & 0 & \sin(\vartheta) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\vartheta) & 0 & \cos(\vartheta) \end{bmatrix} \text{ et } R_{\psi} = \begin{bmatrix} \cos(\psi) & -\sin(\psi) & 0 \\ \sin(\psi) & \cos(\psi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Les matrices précédentes sont définies pour une séquence de rotation ZYZ (pour les angles d'Euler), le mouvement de rotation globale du solide peut être défini par la matrice suivante :

$$R = R_{\zeta} \times R_{\vartheta} \times R_{\psi}.$$

$$R = \begin{bmatrix} C_{\zeta}C_{\vartheta}C_{\psi} - S_{\zeta}S_{\psi} & -C_{\zeta}C_{\vartheta}S_{\psi} - S_{\zeta}C_{\psi} & C_{\zeta}S_{\vartheta} \\ S_{\zeta}C_{\vartheta}C_{\psi} + C_{\zeta}S_{\psi} & -S_{\zeta}C_{\vartheta}S_{\psi} + C_{\zeta}C_{\psi} & S_{\zeta}S_{\vartheta} \\ -S_{\vartheta}S_{\psi} & S_{\vartheta}S_{\psi} & C_{\vartheta} \end{bmatrix} \quad [1.4]$$

Avec C et S représentent les fonctions cosinus et sinus (Sciavico et Siciliano, 2001).

Les angles de Cardan sont obtenus en choisissant l'une des séquences suivantes (XYZ, ZXY...etc.). Compte tenu de la non commutativité du produit matriciel, des séquences de rotation différentes débouchent sur des angles d'Euler différents (Sciavico et Siciliano, 2001). Le choix de séquences de rotation est très important, pour éviter le phénomène de «Gimbal-Lock» (division par zéro). Le «Gimbal-Lock» intervient lorsque le troisième axe de rotation se retrouve, après les deux premières rotations, parallèle au premier axe de rotation juste avant le mouvement. Pour remédier à ce problème, les instances internationales comme l'International Society of Biomechanics (ISB) proposent une définition particulière dans le choix des repères et des séquences de rotation (Wu et al., 2002).

• Convention de (Grood et Suntay, 1983)

La convention de Grood et Suntay (Grood et Suntay, 1983) correspond également à trois rotations successives autour de trois axes. Le premier et le dernier axes de rotation sont chacun liés à un des deux segments liés par l'articulation. Le deuxième axe, suivant lequel a lieu la deuxième rotation, résulte du produit vectoriel des deux autres. Cet axe est appelé axe «flottant» car il n'est fixé à aucun des deux segments articulés. Le repère formé par ces trois axes est appelé «repère lié à l'articulation» et doit être distingué des repères liés aux segments, qui définissent habituellement les axes de rotation pour le calcul des angles d'Euler. Il est à noter que le premier et le troisième axe ne sont perpendiculaires que pour des valeurs particulières de l'angle flottant, défini comme l'angle de rotation autour de l'axe du même nom.

L'orientation relative des deux corps est définie par les rotations successives autour des trois axes et peut par conséquent s'exprimer avec le formalisme d'équation (1.4).

• Angles hélicoïdaux

L'orientation relative de deux segments dans l'espace peut être définie par une rotation θ et une translation t par rapport et suivant un axe unique appelé axe de vissage ou axe hélicoïdal. L'originalité de cette convention réside dans le fait que l'axe de vissage est unique, alors que les conventions précédentes font intervenir trois rotations suivant trois axes différents. L'axe de vissage est défini par un point P lui appartenant et un vecteur directeur unitaire n . Les paramètres P et n sont déduits de la matrice R et du vecteur d de l'équation $y = Ry_1 + d$ (qui donne la position d'un solide mené d'un repère y par rapport à un autre solide de repère y_1).

La méthode des angles hélicoïdaux présente un inconvénient majeur pour son utilisation en biomécanique. En effet, cette méthode est théoriquement applicable au déplacement d'un même solide et non pas au déplacement relatif entre deux solides distincts.

• Les Quaternions

Le formalisme d'usage de quaternions est proposé par Lord Hamilton au 19^{ème} siècle. Un quaternion possède une partie réelle (un scalaire) et une partie imaginaire (représentant un vecteur tridimensionnel). Il est symbolisé par $q = a + bi + cj + dk$ ou a, b, c, d sont des nombres réels et i, j, k sont trois axes orthonormés imaginaires tels que $ii = jj = kk = -1$. Des quaternions unitaires $a^2 + b^2 + c^2 + d^2 = 1$ sont utilisés pour représenter des rotations. Une rotation d'un angle θ autour d'un vecteur v s'exprime par :

$$q = \left(\cos\left(\frac{\theta}{2}\right) + \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)v\right) \text{ avec } v = bi + cj + dk.$$

On distingue donc deux formulations du quaternion :

- Une représentation *graphique* permettant d'explicitier la rotation sous une forme géométrique à l'aide d'un vecteur unitaire et d'un scalaire représentant l'amplitude de la rotation.
- Une représentation *mathématique* permettant d'utiliser de multiples opérateurs (tels que la multiplication, l'inversion, l'interpolation . . .) qui s'appliquent à la rotation.

L'usage des quaternions présente l'avantage de pouvoir interpoler entre deux quaternions. L'inconvénient majeur des quaternions est l'abstraction de leur notion par rapport aux autres formalismes (comme les angles d'Euler).

1.5.5 Conclusion

Ce paragraphe a présenté les différentes étapes menant à la construction de la base de mouvements exploitables. Dans un premier temps les systèmes de capture de mouvements sont présentés. Les systèmes optoélectroniques apparaissent les plus performants pour notre application. Cependant, ils sont sujets à différents problèmes liés aux erreurs instrumentales et expérimentales. Des solutions pour remédier à ces aléas sont proposées dans la littérature.

Corriger la perte de marqueur en utilisant un repère à base d'autres marqueurs appartenant au même segment corporel est une méthode simple et efficace. Pour corriger les erreurs instrumentales, les méthodes à base d'optimisations semblent donner de bons résultats car elles permettent de tenir compte de la physiologie humaine.

L'exploitation des données suppose l'existence d'un modèle biomécanique (balistiques, squelettique, musculosquelettique), inspiré de l'être humain, plus ou moins détaillé. Les modèles squelettiques tridimensionnels inspirés de l'anatomie du corps humain apparaissent les mieux adaptés à notre application. La convention de Denavit et Hartenberg est alors souvent retenue pour décrire mathématiquement les modèles squelettiques. Des rappels anatomiques succins du tronc et des membres inférieurs sont par la suite présentés. Enfin, pour étudier le mouvement d'accessibilité automobile il semble important de décomposer le tronc en au moins deux parties. Les membres inférieurs sont généralement modélisés par 7 DDL.

L'estimation des centres articulaires est nécessaire pour calculer les longueurs segmentaires et les angles articulaires. Des méthodes d'estimation des centres articulaires des articulations des membres inférieurs sont présentées. La méthode fonctionnelle est mieux adaptée par rapport à la méthode à base d'équations de régression.

La biomécanique dispose de plusieurs techniques pour quantifier l'orientation spatiale d'un corps par rapport à un autre corps et par rapport au repère du monde. Quatre techniques de calcul d'angles articulaires sont présentées : les angles d'Euler et de Cardan, la convention de Grood et Suntay (Grood et Suntay, 1983), les angles hélicoïdaux et les Quaternions. La convention de Grood et Suntay (Grood et Suntay, 1983) représente un cas pratique des angles d'Euler retenue dans les études biomécaniques.

Après le recueil des données, des analyses sont effectuées afin de quantifier et classer les mouvements humains. Ces quantifications et classifications sont utiles pour la simulation. Le prochain paragraphe présente une synthèse concernant quelques techniques de quantification et classification de différents mouvements humains rapportées dans la littérature.

1.6 QUANTIFICATION ET CLASSIFICATION DES MOUVEMENTS

1.6.1 Introduction

Les redondances multiples du corps humain (cinématiques, musculaires, neuro-musculaires) autorisent chaque homme à effectuer un mouvement particulier d'une infinité de façons différentes. L'observation commune et des études scientifiques mettent en évidence pour de nombreux mouvements des solutions préférentielles en nombre limité (Lepoutre, 93). Ces mouvements préférentiels sont appelés stratégies. Les approches mises en œuvre pour

déterminer ces stratégies motrices semblent pouvoir se répartir en 2 catégories : la première catégorie rassemble les approches qualitatives basées sur l'observation, la deuxième catégorie réunit les approches quantitatives qui s'appuient sur des procédures de calculs automatiques.

1.6.2 Classification des mouvements par observation

Cette approche est basée sur l'expertise du chercheur et la pertinence de ses observations. Parmi les références qui traitent de cette catégorie, 3 types d'études peuvent être distingués : les études considérant des mouvements n'ayant pas de rapport à l'automobile, les études considérant des mouvements en rapport avec l'automobile et les études considérant le mouvement d'accessibilité automobile. Ce dernier ayant déjà fait l'objet d'un développement au paragraphe 1.3.3, nous ciblons notre attention sur les deux premiers.

1.6.2.1 Etudes considérant des mouvements hors automobile

Les études hors automobile ne manquent pas. Par exemple, Assiante (Assiante, 1996) présente l'évolution des stratégies d'équilibre des enfants âgés de 6 à 8 ans ; McMillan et Scholz (McMillan et Scholz, 2000) distinguent trois stratégies de transition assis – debout chez cinq petites filles en bas âge en vue d'étudier la coordination motrice reliée à ce mouvement ; Wangner et al. (Wagner et al., 2005) mettent en évidence deux stratégies de positionnement des pieds lors de la réalisation de tâches manuelles ; Bendahan (Bendahan, 2006) discriminent trois stratégies de préhension d'un objet dans un environnement encombré par la présence d'obstacle.

1.6.2.2 Etudes considérant des mouvements en rapport avec l'automobile

Parmi les applications industrielles, l'automobile est une application pour laquelle les stratégies motrices ont souvent été recherchées. Par exemple, Monnier et al. (Monnier et al., 2002) ont identifié trois stratégies de bouclage de ceinture de sécurité ; Andreoni et al. (Andreoni et al., 2002) ont identifié deux stratégies d'assise sur le siège automobile lors de l'étude des postures de conducteurs et Oudehuyzen et al. (Oudenhuyzen et al., 2004) et Freeman et al. (Freeman et Haslegrave, 2004) identifient quelques stratégies optimales de débrayage. D'autres auteurs proposent des stratégies préventives de sécurité telles que les stratégies du regard de conducteur (Liu, 2005) ou encore les stratégies d'assises qui visent à réduire les vibrations globales du corps humain (Tiemessen et al., 2007).

Ces travaux d'observations s'avèrent très utiles dans la compréhension du comportement humain. Ils demandent néanmoins une grande expertise et souffrent indéniablement du manque de repères numériques, indispensables à la simulation des mouvements humains.

1.6.3 Classification quantitative des mouvements

La seconde catégorie pour classifier les mouvements est quantitative. Elle peut faire usage d'indices géométriques, d'algorithmes de classification et d'approches procédurales.

1.6.3.1 Usage d'indices

Pour décrire la position initiale du mouvement de soulever de charge, Burgess-Limerick et Abernethy (Burgess-Limerick et Abernethy, 1997) proposent un indice géométrique calculé comme le rapport entre la flexion du genou et la somme des flexions de la cheville, de la hanche et des lombaires. Zhang et al. (Zhang et al., 2000) combinent une technique de cinématique inverse avec une technique heuristique d'optimisation à base d'erreurs tests pour définir un indice à deux paramètres. Cet indice sert à quantifier la contribution des vitesses des membres inférieurs et du dos par rapport à la vitesse linéaire de l'épaule.

La construction de ces indices nécessite une bonne expertise du mouvement à étudier.

1.6.3.2 Usage des algorithmes de classification

Des algorithmes de classification sont utilisés pour d'une part, étudier les caractéristiques du mouvement humain et/ou d'autre part, pour classifier les mouvements humains en des familles de mouvements distincts. Les méthodes sont nombreuses et le choix d'une d'entre elles est souvent lié au domaine scientifique dans lequel le chercheur évolue.

Parmi les études qui utilisent des algorithmes de classification figurent des méthodes issues du domaine du traitement d'images qui sont utilisées pour la reconnaissance, la classification et la différenciation des mouvements humains (Rittscher et al., 2002; Masoud et Papanikolopoulos, 2003; Meng et al., 2006; Wang et Suter, 2008). D'autres auteurs, comme Del Vecchio et al. (Delvecchio et al., 2003) s'inspirent de la théorie des systèmes dynamiques et de l'identification des systèmes afin de différencier plusieurs mouvements de dessins manuels. Ces auteurs décomposent le mouvement humain en des mouvements élémentaires nommés les « movemes ». Puis, ils développent des algorithmes de classification qui leurs permettent de décomposer un mouvement complexe en des « movemes ».

D'autres chercheurs ont recours à des algorithmes à base d'apprentissage pour classifier les mouvements humains. Ces algorithmes sont utilisés généralement pour des applications médicales. Maksimovic et Popovic (Maksimovic et Popovic, 1999) combinent un réseau de neurones avec un algorithme à base d'ondelettes pour classifier automatiquement des mouvements des tétraplégiques. Lakany (Lakany, 2008) utilise un algorithme à base d'ondelettes pour extraire des caractéristiques spatio-temporelles des trajectoires angulaires de la marche humaine afin de distinguer la marche saine de la marche pathologique. Wu et al. (Wu et al., 2007) combinent une analyse en composantes principales à base de Kernel avec un algorithme SVM (Support Vector Machine) pour extraire les caractéristiques de la marche

humaine en vue de différencier la marche des sujets jeunes de celle des personnes âgées. Havasi et al. (Havasi et al., 2006) procèdent de manière identique en utilisant la méthode de discrimination de Kernel-Fisher pour extraire les caractéristiques de symétrie de différentes marches humaines en vue de les classer.

L'usage de ces techniques nécessite cependant une certaine maîtrise des domaines (traitement d'images, réseaux de neurones...).

1.6.3.3 Usage d'une approche procédurale

D'autres auteurs proposent des approches demandant plusieurs étapes afin de classer les mouvements humains. Ils recourent aux techniques d'analyse de données et aux statistiques. Park et al. (Park et al., 2005) définissent une démarche à plusieurs étapes qui nécessite le calcul d'un indice biomécanique, qu'ils nomment JCV (Joint Contribution Vector), pour quantifier les mouvements tridimensionnels du corps humain. Ils calculent la contribution des angles articulaires dans le positionnement final d'un organe terminal. La contribution est calculée en comparant deux mouvements identiques dont pour l'un d'eux la contribution d'un degré de liberté (DDL) est supprimée. Une classification semi automatisée, en utilisant l'algorithme des K-Means, est alors appliquée sur les différents indices calculés. Cette méthode donne de bons résultats quand il s'agit de classer des mouvements simples et trouve ces limites quand elle est confrontée aux mouvements complexes et cycliques (Adams et Cerney, 2007). De plus, cette démarche « impose » à l'avance le nombre de classes (compte tenu qu'elle utilise une classification supervisée). Adams et Cerney (Adams et Cerney, 2007) définissent une démarche à plusieurs étapes qui consiste à faire une analyse nommée PMA (Procrustes Motion Analysis) pour classer des mouvements humains complexes. Leur méthode se base sur l'évaluation des amplitudes, formes et orientations spatiales des trajectoires des différents mouvements. Ils considèrent plusieurs calculs statistiques dans leur démarche. Leur approche leur permet de distinguer et de classer quelques mouvements complexes, comme des combinaisons de rotations réalisées par les membres supérieurs ou encore les deux stratégies de soulever de charge. Lempereur (Lempereur, 2006) propose une démarche à plusieurs étapes pour classer les mouvements d'accessibilité automobile chez les personnes jeunes. Cette démarche impose un découpage et un codage spatio-temporel des données articulaires, suivi d'une Analyse Factorielle en Composantes Multiples (AFCM) sur les données codées. L'AFCM permet à cet auteur de dégager les angles articulaires pertinents, avec lesquels il classifie les mouvements d'entrée à l'aide d'une Classification Hiérarchique Ascendante (CHA). Cette démarche permet de tenir compte de la variété des stratégies d'entrée dans un véhicule automobile.

1.6.4 Conclusion

Les approches mises en œuvre pour déterminer les stratégies motrices semblent pouvoir se répartir en 2 catégories : la première catégorie rassemble les approches qualitatives basées sur l'observation, la deuxième catégorie réunit les approches quantitatives qui s'appuient sur des procédures de calculs automatiques.

L'usage de l'observation pour classifier les mouvements humains demande une grande expertise et souffre indéniablement du manque de repères numériques. Cette catégorie apparaît insuffisante lorsque l'objectif est la simulation des mouvements humains.

Au contraire, les méthodes quantitatives de classification apportent les repères numériques nécessaires à la simulation réaliste des mouvements humains.

La définition de bons indices, nécessaires pour toute classification quantitative, demande d'avoir une certaine expertise et connaissance de mouvement. L'approche procédurale a déjà été retenue par Lempereur (Lempereur, 2006) au LAMIH pour classifier le mouvement d'entrée chez le sujet jeune. Les résultats ont été jugés satisfaisants.

1.7. CONCLUSION

Ce chapitre a présenté, dans une revue de littérature, les différentes étapes conduisant à la simulation de mouvements complexes, et plus particulièrement à celui de l'accessibilité automobile à partir de données réelles.

Le mannequin numérique représente l'outil le plus approprié pour simuler des mouvements humains et en particulier le mouvement d'accessibilité automobile. Malgré le nombre important de caractéristiques qui l'apparentent de plus en plus à l'être humain, des lacunes persistent. Par conséquent, les mannequins numériques, qui manquent de bases de données représentatives des populations à mobilité réduite ainsi que d'algorithmes de simulation de mouvements complexes, n'apportent pas encore de solutions au problème de la simulation du mouvement d'accessibilité au véhicule automobile des personnes à mobilité réduite.

Ce manque peut se justifier par le manque d'études dédiées à cette thématique (moins de 20 articles à notre connaissance). De plus, très peu d'études (moins de 5 a priori) abordent les personnes âgées et/ou ayant des déficiences motrices. Parmi les maquettes physiques utilisées dans la littérature pour étudier le mouvement d'accessibilité, la transformation d'un véhicule réel permet de sauvegarder au mieux les caractéristiques physiques et favorise donc la production d'un mouvement d'accessibilité réaliste. Un préambule à l'analyse consiste alors à découper le mouvement complexe d'accessibilité automobile en des phases.

Pour générer des mouvements humains, 2 groupes de techniques peuvent être référencés : les techniques de génération de mouvements à base de connaissances sur le

mouvement et les techniques exploitant des bases de mouvements. Les techniques à base de connaissances semblent difficilement envisageables pour simuler le mouvement d'entrée dans un véhicule automobile. Les techniques à base de mouvements génèrent de nouveaux mouvements en utilisant des mouvements appartenant à une base de données. Deux grandes classes regroupant ces méthodes sont distinguées. La classe de méthodes utilisant plusieurs mouvements de la base de données pour générer un nouveau mouvement (généralement mieux adaptées pour l'animation) et les méthodes utilisant un mouvement de référence. Parmi les techniques de la dernière classe, la méthode dite de « spacetime optimization » semble être plus intéressante pour simuler des mouvements tridimensionnels avec contraintes comme le mouvement d'entrée dans un véhicule automobile.

La construction d'une base de mouvements exploitables demande plusieurs étapes. Pour mesurer le mouvement d'accessibilité, les chercheurs retiennent majoritairement le système optoélectronique à capteurs passifs. Cependant, ils sont sujets à différents problèmes liés aux erreurs instrumentales et expérimentales. Des solutions pour remédier à ces aléas sont proposées dans la littérature. Corriger la perte des marqueurs en utilisant un repère à base d'autres marqueurs appartenant au même segment corporel est une méthode simple et efficace. Pour corriger les erreurs instrumentales, les méthodes à base d'optimisations semblent donner de bons résultats car elles permettent de tenir compte de la physiologie humaine.

Les modèles squelettiques semblent être les mieux adaptés pour simuler la cinématique du mouvement d'entrée. La convention de Denavit et Hartenberg (Denavit et Hartenberg, 1955) est souvent retenue pour décrire les modèles squelettiques. Pour étudier ce mouvement, il faut décomposer le tronc en au moins deux parties et prendre en considération une partie du corps importante dans ce mouvement : la tête. Les membres inférieurs sont généralement modélisés par 7 DDL. L'estimation des centres articulaires est nécessaire pour calculer les longueurs segmentaires et les angles articulaires. La méthode fonctionnelle semble être la mieux appropriée. Pour quantifier l'orientation spatiale d'un corps par rapport à un autre corps et par rapport au repère du monde, la convention de Grood et Suntay (Grood et Suntay, 1983) (un cas pratique des angles d'Euler) est retenue dans des études biomécaniques.

L'identification de stratégies par la quantification et classification du mouvement est utile pour la simulation. Parmi les techniques quantitatives de classification de mouvements, l'approche procédurale semble être la mieux appropriée pour l'étude du mouvement d'entrée au véhicule automobile. Elle a déjà été retenue par Lempereur (Lempereur, 2006) pour classifier le mouvement d'entrée chez le sujet jeune. Les résultats ont été jugés satisfaisants.

Parmi les études qui proposent de simuler le mouvement d'entrée, Lempereur (Lempereur, 2006) propose une méthodologie efficace en 4 étapes pour simuler le mouvement d'entrée dans un véhicule fixe. Le passage au véhicule variable nécessite de connaître les

paramètres influant le plus le mouvement. L'étude ergonomique du mouvement d'entrée-sortie répond à cette question en soulignant l'importance de la hauteur du siège, du brancard et du bavolet sur le mouvement d'entrée-sortie.

Au regard de cette conclusion, le chapitre suivant introduit notre proposition pour simuler le mouvement d'entrée dans un véhicule automobile.

CHAPITRE 2
METHODOLOGIE POUR SIMULER
LE MOUVEMENT D'ENTREE DANS
UN VEHICULE AUTOMOBILE

CHAPITRE 2 : METHODOLOGIE POUR SIMULER LE MOUVEMENT D'ENTREE DANS UN VEHICULE AUTOMOBILE

2.1 INTRODUCTION

L'objectif de ce chapitre est de présenter la démarche méthodologique développée dans le cadre de ce mémoire afin de simuler le mouvement d'entrée dans un véhicule automobile. Plus précisément, il s'agit de décrire la cinématique du mouvement d'entrée d'un humanoïde de synthèse (constitué ici d'une tête, d'un tronc, d'un bassin et des membres inférieurs) dans des véhicules de dimensions variables. Dans une première partie, nous précisons les restrictions et hypothèses prises en compte dans notre étude. Puis, de manière synthétique, nous décrivons les 3 étapes de la méthodologie (construction d'une base de mouvements, analyse et identification des stratégies du mouvement d'entrée et développement des algorithmes et calculs de simulation).

Après avoir précisé la structure de notre humanoïde de synthèse et son animation, les 2 dernières étapes de cette méthodologie sont développées. La construction de la base de mouvements, fondée sur des expérimentations, est renvoyée au Chapitre 3. Une petite étude relative à l'analyse de la robustesse du simulateur clôture ce chapitre.

2.2 RESTRICTIONS ET HYPOTHESES DE L'ETUDE

Le Chapitre 1 témoigne de la complexité de la problématique soulevée dans ce mémoire. C'est la raison pour laquelle cette première partie a pour but d'exposer les restrictions et hypothèses que nous avons retenu dans notre étude afin d'aborder la problématique graduellement (Cf. Chapitre 5).

2.2.1 Restrictions de l'étude

Les travaux décrits dans ce manuscrit ont pour objet de simuler la cinématique du mouvement d'entrée d'un sujet représenté par un humanoïde de synthèse (constitué ici d'une tête, d'un tronc, d'un bassin et des membres inférieurs) dans des véhicules automobiles de taille variable. Pour cela, un certain nombre de simplifications ont été nécessaires pour mener à terme nos travaux de recherche :

- Les membres supérieurs ne sont pas considérés.
- Les causes du mouvement (forces et couples articulaires) ne sont pas pris en compte.

- Seule la phase 2 de l'entrée, décrite par Ait El Menceur et al. (Ait El Menceur et al., 2006), dite phase « d'adaptation » du mouvement d'entrée, a été étudiée.

2.2.2 Hypothèses de l'étude

Les hypothèses ont pour objectif de simplifier la problématique. Elles constituent autant de perspectives de recherches, sur lesquelles nous revenons au Chapitre 5.

- Pour une (sous-) stratégie donnée, les « distances d'interaction »* calculées entre le sujet et le véhicule automobile sont constantes (ex. pour une (sous-) stratégie donnée, le pied passe toujours au dessus du bavolet* au même endroit quelque soit le véhicule automobile considéré).
- Pour une (sous-) stratégie donnée, les interactions entre le sujet et le véhicule se réalisent toujours au même moment proportionnellement à la phase d'entrée (ex. pour une (sous-) stratégie donnée, le pied passe toujours au dessus du bavolet à X% de la phase d'entrée quelque soit le véhicule automobile considéré).

2.3 PRESENTATION DE LA DEMARCHE METHODOLOGIQUE

La démarche méthodologique proposée pour simuler le mouvement d'entrée dans un véhicule de taille variable comporte 3 étapes (Cf. Fig. 2.1) :

1 *Construction de la base de mouvements pour la simulation*

Cette étape vise à constituer une base de mouvements à partir de données expérimentales. Les mouvements dits « exploitables » sont le résultat de traitements numériques (Cf. Chapitre 3) appliqués aux mouvements d'entrée mesurés. Ces traitements permettent, entre autres, d'adapter les angles articulaires mesurés à l'humanoïde de synthèse retenu afin d'éviter d'éventuelles collisions avec l'habitacle qui n'auraient pas été constatées lors des expérimentations.

2 *Analyse et identification des stratégies motrices d'entrée dans un véhicule automobile*

Cette étape permet de déterminer de manière automatique les stratégies d'entrée dans un véhicule automobile. Cette étape procède en 4 phases, caractérisées par : le calcul des indices 3BJCV (3 Bases Joint Contribution Vector) du mouvement d'entrée, l'identification des principales stratégies du mouvement d'entrée à partir des indices 3BJCV, le calcul des angles articulaires pertinents et enfin l'identification des sous stratégies du mouvement d'entrée. A l'issue de cette étape les classes ainsi que les sous classes du mouvement d'entrée sont déterminées.

3 *Simulation du mouvement d'entrée dans un véhicule automobile*

Cette étape constitue la phase de simulation cinématique du mouvement d'entrée d'un humanoïde de synthèse (constitué d'une tête, d'un tronc, d'un bassin et des membres inférieurs) dans des habitacles de taille variable. Cette étape utilise à la fois les acquis

issus des étapes 1 et 2, mais également les consignes délivrées par l'utilisateur du simulateur (choix d'un sujet de la base et de la géométrie du véhicule considéré).

Les étapes 1 et 2 résultent d'un travail a priori et sont transparentes pour l'utilisateur du simulateur. Dans l'étape 3, l'utilisateur choisit un sujet parmi les sujets existants dans la base de mouvements, ainsi que les dimensions du véhicule dans lequel il souhaite voir se réaliser la simulation du mouvement d'entrée.

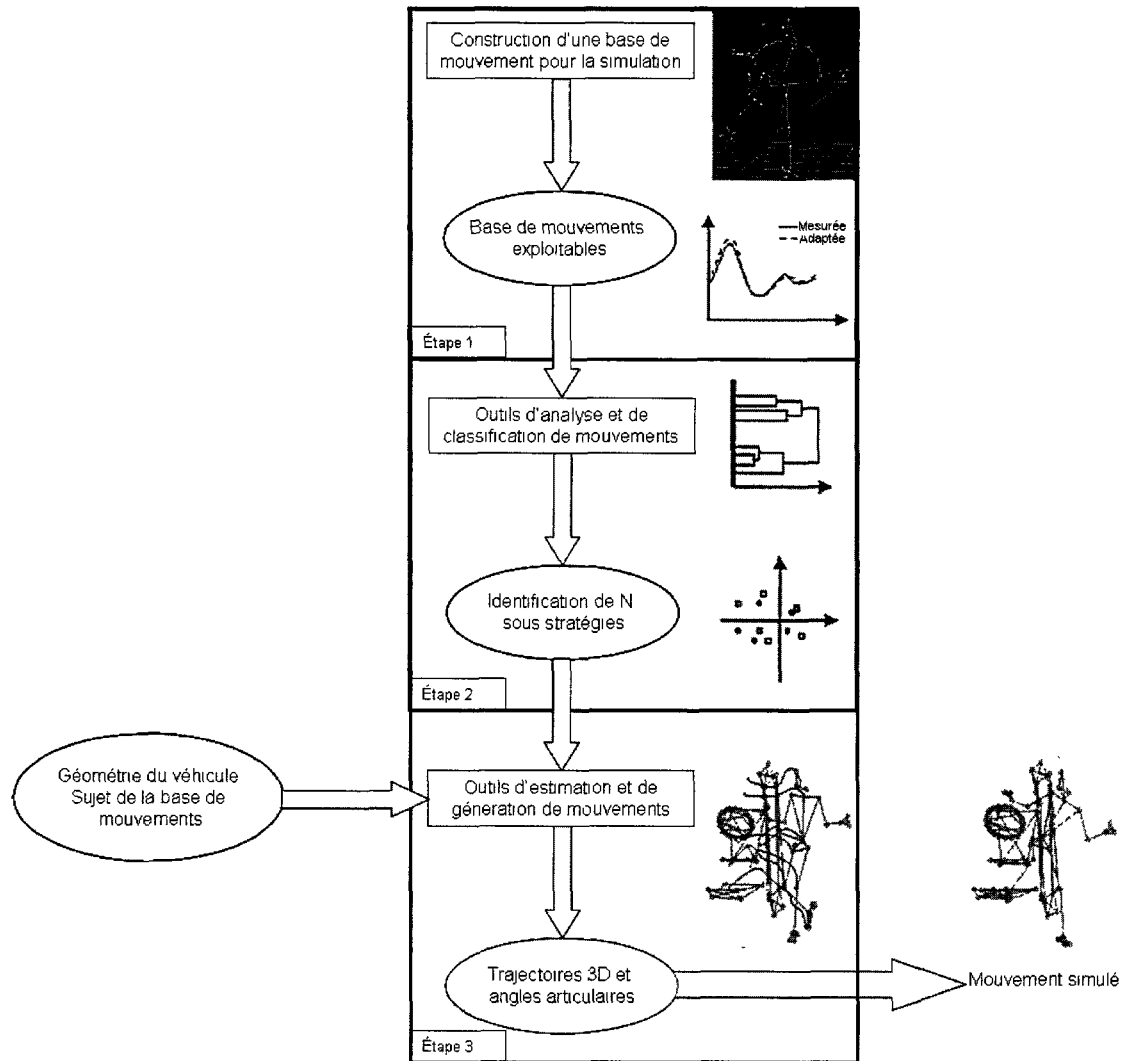


Figure 2 1. Schéma de principe de la démarche méthodologique proposée pour prédire le mouvement d'entrée dans un véhicule automobile de géométrie variable.

L'étape 1 est plus largement développée dans le chapitre 3. Les étapes 2 et 3 constituent l'essentiel des parties détaillées dans ce chapitre. Un préalable à ces 2 étapes est la modélisation du sujet étudié par un humanoïde de synthèse, présenté ci-après.

2.4 MODELISATION DE L'HUMANOÏDE DE SYNTHESE ET ANIMATION DU MOUVEMENT D'ENTREE

La structure squelettique du corps humain comporte plus de deux cents degrés de liberté (Barin, 1989) (Cf. Chapitre 1). Chaque modèle proposé est construit en fonction du problème à traiter. La modélisation est une approche opportuniste et chaque chercheur représente bien souvent le système étudié avec les outils de sa discipline scientifique. Dans la présente étude, les outils utilisés dans le processus de modélisation sont issus de la robotique. Le paragraphe suivant présente le modèle géométrique de notre humanoïde de synthèse, les paramètres géométriques le décrivant ainsi que l'animation du mouvement d'entrée.

2.4.1 L'humanoïde

Le modèle poly-articulé représentatif de l'être humain est composé de corps rigides et d'articulations rotoïdes. Un corps de référence représente le bassin. Trois chaînes cinématiques ouvertes, connectées au bassin, représentent les 2 membres inférieurs (appelées chaînes « Membre Inférieur ») et la chaîne réunissant le haut du tronc et la tête (nommée chaîne « Tronc + Tête ») (Cf. Fig. 2.2). Ce modèle est composé de 9 segments rigides représentant les 2 pieds, les 2 jambes, les 2 cuisses, la partie du tronc en dessous de la vertèbre lombaire L5 (5^{ème} lombaire), la partie du tronc au dessus de la vertèbre lombaire L5 et la tête (Cf. Fig. 2.2). Ces segments sont articulés entre eux par des articulations de type rotoïde. Le modèle proposé compte 20 DDL (degré de liberté) : 3 DDL pour les hanches, la liaison définie comme le milieu entre L5 et le pubis (nommé L5 par la suite) et la liaison définie comme le milieu entre C7 et le manubrium* (appelée C7 dans la suite du document), 2 DDL pour le genou et la cheville. La convention de Denavit et Hartenberg (Denavit et Hartenberg, 1955) est retenue pour décrire les 3 chaînes cinématiques ouvertes constitutives de notre modèle (Cf. §2.4.2). Ce dernier est utilisé pour le calcul des angles articulaires à partir des données expérimentales (Cf. Chapitre 3) et pour animer le mouvement d'entrée dans le véhicule automobile (Cf. §2.4.4).

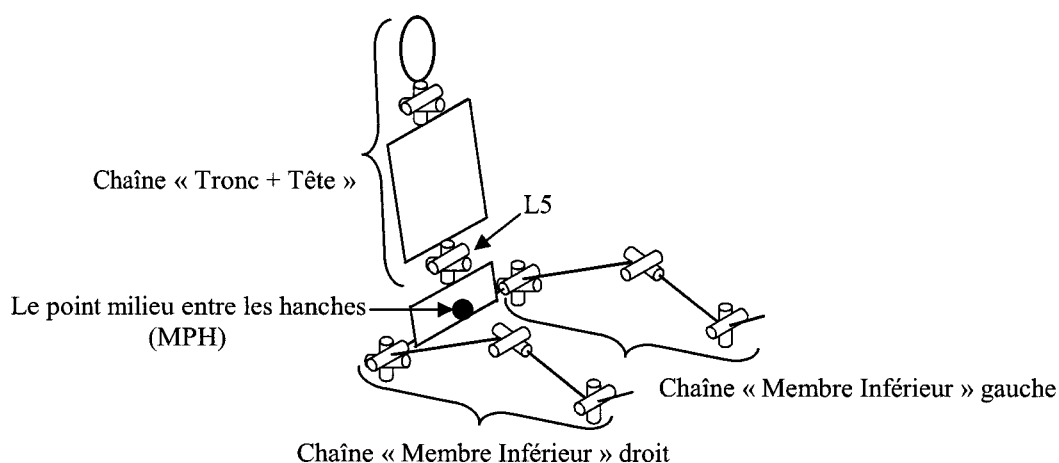


Figure 2 2. *Modèle tridimensionnel poly-articulé représentatif du corps humain ; ce dernier est constitué de 3 chaînes cinématiques ouvertes simples, la chaîne rassemblant le tronc et la tête, les chaînes représentant le membre inférieur droit et gauche.*

2.4.2 Description géométrique de l'humanoïde

La convention de Denavit et Hartenberg (Denavit et Hartenberg, 1955) est retenue pour décrire les 3 chaînes cinématiques ouvertes de ce modèle. Cette convention trouve tout son intérêt dans la description des paramètres géométriques décrivant le passage d'une articulation à 1 DDL à une autre, elle-même à 1 DDL.

2.4.2.1 Convention de Denavit et Hartenberg

Cette convention suppose que chaque chaîne ouverte est composée de $N+1$ corps, notés C_0, C_1, \dots, C_N . Le corps C_0 désigne la base du modèle (le bassin dans notre cas) et le corps C_N (les 2 pieds et la tête dans notre cas) porte l'organe terminal. Les N articulations ($N=7$ pour les chaînes « Membre Inférieur », $N=6$ pour la chaîne « Tronc + Tête ») sont supposées idéales et relient entre elles chaque corps de la chaîne (Cf. Fig. 2.3). Par convention, l'articulation A_i relie le corps C_{i-1} au corps C_i .

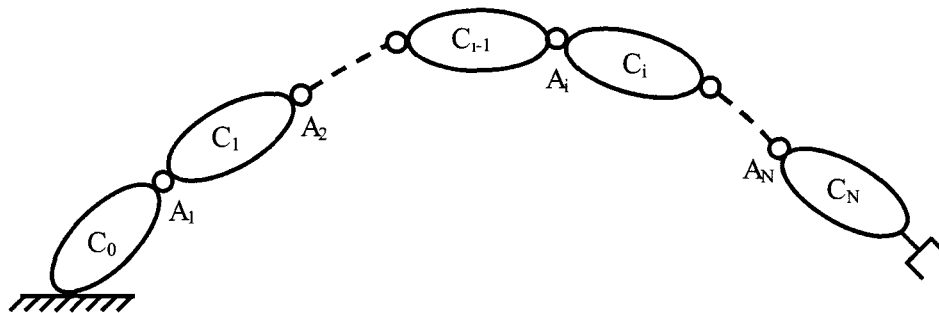


Figure 2 3. *Chaîne cinématique simple ouverte.*

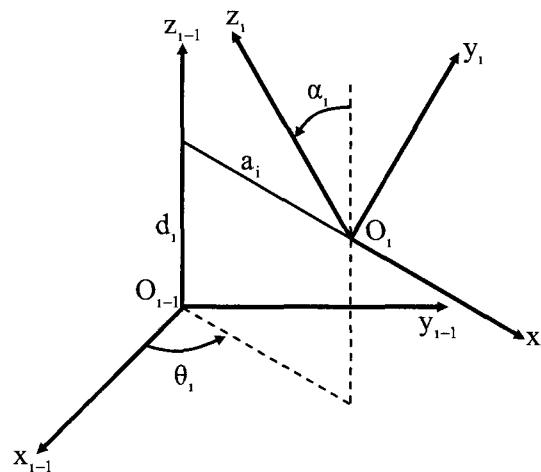


Figure 2 4. *Paramètres de Denavit et Hartenberg (1955).*

Un repère R_i est lié à chaque corps C_i . L'axe z_{i-1} est porté par l'articulation A_i . L'axe x_{i-1} est porté par la perpendiculaire commune z_{i-1} et z_i . Le passage du repère R_{i-1} au repère R_i s'exprime en fonction de 4 paramètres : θ_i , d_i , α_i et a_i :

- θ_i : angle entre x_{i-1} et x_i , correspondant à une rotation autour de z_{i-1} ,
- d_i : distance entre x_{i-1} et x_i le long de z_{i-1} ,
- α_i : angle entre z_{i-1} et z_i , correspondant à une rotation autour de x_i ,
- a_i : distance entre z_{i-1} et z_i le long de l'axe x_i .

La figure 2.4 présente les 4 paramètres de Denavit et Hartenberg (Denavit et Hartenberg, 1955).

2.4.2.2 Définition des paramètres de Denavit et Hartenberg

Les tableaux 2.1 et 2.2 donnent respectivement les paramètres de Denavit et Hartenberg pour les chaînes « Membre Inférieur » et « Tronc + Tête ».

I	α_i	a_i	θ_i	d_i	Valeur de θ_i
1	-90°	0	θ_1	0	0°
2	-90°	0	θ_2	0	-90°
3	-90°	$-L_1$	θ_3	0	-90°
4	-90°	0	θ_4	0	-90°
5	90°	0	θ_5	$-L_2$	0°
6	90°	0	θ_6	0	90°
7	0°	0	θ_7	L_3	0°

Tableau 2 1. Paramètres de Denavit et Hartenberg (Denavit et Hartenberg, 1955) de la chaîne « Membre Inférieur ».

I	α_i	a_i	θ_i	d_i	Valeur de θ_i
1	-90°	0	θ_1	0	0°
2	90°	0	θ_2	0	-90°
3	-90°	L_1	θ_3	0	-90°
4	-90°	0	θ_4	0	-90°
5	-90°	0	θ_5	0	-90°
6	90°	L_2	θ_6	0	0°

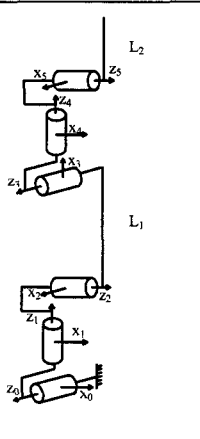


Tableau 2 2. Paramètres de Denavit et Hartenberg (Denavit et Hartenberg, 1955) de la chaîne « Tronc + Tête ».

• Pour la chaîne « Membre Inférieur »

Les paramètres θ_1 , θ_2 et θ_3 représentent respectivement l'angle de flexion/extension, l'angle de rotation interne/externe et l'angle d'abduction/adduction de la hanche, les paramètres θ_4 et θ_5 représentent respectivement l'angle de flexion/extension et l'angle de rotation interne/externe du genou, les paramètres θ_6 et θ_7 sont respectivement l'angle de flexion/extension et l'angle d'abduction/adduction de la cheville. Les paramètres L_1 , L_2 et L_3 sont les longueurs de la cuisse, de la jambe et du pied respectivement.

• Pour la chaîne « Tronc + Tête »

Les paramètres θ_1 , θ_2 et θ_3 représentent respectivement l'angle de flexion/extension, l'angle de rotation interne/externe et l'angle d'abduction/adduction de l'articulation liant la partie basse du tronc (le bassin) et la partie haute du tronc à hauteur de la vertèbre lombaire L5, les paramètres θ_4 , θ_5 et θ_6 représentent respectivement l'angle de flexion/extension, l'angle de rotation interne/externe et l'angle d'abduction/adduction de l'articulation liant la partie haute du tronc à la tête à hauteur de la vertèbre cervicale C7. Les paramètres L_1 et L_2 sont les longueurs respectivement de la partie haute du tronc et de la tête.

2.4.3 Modèle géométrique direct de l'humanoïde

Le Modèle Géométrique Direct (MGD) permet de calculer, par définition, les coordonnées opérationnelles (position et orientation) de l'effecteur (pieds et tête dans notre cas) en fonction des coordonnées articulaires des chaînes cinématiques (Khalil et Dombre, 1999). Le Modèle Géométrique Direct est représenté par la matrice de transformation homogène 0T_N exprimant le repère du corps N dans le repère du corps 0.

La matrice de transformation homogène (Cf. Annexe A.2.1 pour une introduction aux matrices de transformation homogène) exprimant le repère R_i dans le repère R_{i-1} est définie en fonction des paramètres de Denavit et Hartenberg par :

$${}^{i-1}T_i = \text{rot}(z, \theta_i) \times \text{trans}(z, d_i) \times \text{trans}(x, a_i) \times \text{rot}(x, \alpha_i) \quad [2.1]$$

$${}^{i-1}T_i = \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i & 0 & 0 \\ s\theta_i & c\theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c\alpha_i & -s\alpha_i & 0 \\ 0 & s\alpha_i & c\alpha_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad [2.2]$$

$${}^{i-1}T_i = \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i c\alpha_i & s\theta_i s\alpha_i & a_i c\theta_i \\ s\theta_i & c\theta_i c\alpha_i & -c\theta_i s\alpha_i & a_i s\theta_i \\ 0 & s\alpha_i & c\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad [2.3]$$

où θ_i , α_i , d_i et a_i sont les paramètres de Denavit et Hartenberg définissant R_i dans R_{i-1} .

La multiplication des matrices de transformation homogène permet d'obtenir la position ($f(\theta)$) et l'orientation (${}^0R_N(\theta)$) du corps N par rapport au repère R_0 :

$${}^0T_N = {}^0T_1 \times {}^1T_2 \times \dots \times {}^{N-1}T_N \quad [2.4]$$

$${}^0T_N = \begin{bmatrix} {}^0R_N(\theta) & f(\theta) \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad [2.5]$$

L'ensemble de ces relations définit le Modèle Géométrique Direct.

2.4.4 Animation du mouvement d'entrée dans un véhicule automobile

L'animation du mouvement d'entrée dans un véhicule automobile s'applique aux mouvements « mesurés » ou aux mouvements « prédits ». Cette dernière a pour objectif d'afficher séquentiellement les postures construites (dessinées) à partir des points caractéristiques définissant l'humanoïde (ex. la cheville, le genou). Quelque soit le point considéré, la méthode est identique. Prenons le cas des effecteurs, les points les plus distaux de la base (le bassin) :

- *Pour la chaîne « Membre Inférieur »*

L'effecteur de la chaîne représentant le membre inférieur est le point milieu situé entre le 1^{er} et le 5^{ème} métatarse (du pied, Cf. Chapitre 3). La position de cet effecteur, exprimé dans le repère véhicule à chaque instant, est extraite de l'équation suivante :

$${}^{veh}T_{P_{ped}}(t) = \text{Trans}({}^{veh}BASSIN(t)) \times \text{Rot}({}^{veh}\theta_{BASSIN}(t)) \times \text{Trans}({}^{BASSIN}H(t)) \times {}^{BASSIN}T_{P_{ped}}(t) \quad [2.6]$$

avec ${}^{veh}T_{Pied}(t)$ la matrice homogène définissant, à chaque instant, le repère lié au pied par rapport au repère lié au véhicule automobile, ${}^{veh}BASSIN(t)$ la position, à chaque instant, du bassin exprimée dans le repère lié au véhicule automobile, ${}^{veh}\theta_{BASSIN}(t)$ l'orientation spatiale du bassin exprimée, à chaque instant, dans le repère lié au véhicule automobile, ${}^{BASSIN}H(t)$ la position de l'hanche exprimée, à chaque instant, dans le repère lié au bassin, ${}^{BASSIN}T_{Pied}(t) = {}^{BASSIN}T_1(t) \times {}^1T_2(t) \times \dots \times {}^6T_{Pied}(t)$ la matrice homogène définissant le repère lié au Pied par rapport au repère de base celle du bassin et d'origine la hanche H.

- *Pour la chaîne « Tronc + Tête »*

L'effecteur de la chaîne rassemblant le haut du tronc et la tête est le milieu des 2 tempes (Cf. Chapitre 3). La position de cet effecteur, exprimé dans le repère véhicule à chaque instant est extraite de l'équation suivante :

$${}^{veh}T_{Tete}(t) = Trans({}^{veh}BASSIN(t)) \times Rot({}^{veh}\theta_{BASSIN}(t)) \times Trans({}^{BASSIN}L5(t)) \times {}^{BASSIN}T_{Tete}(t) [2.7]$$

avec ${}^{veh}T_{Tete}(t)$ la matrice homogène définissant, à chaque instant, le repère lié à la tête par rapport au repère lié au véhicule automobile, ${}^{veh}BASSIN(t)$ la position, à chaque instant, du bassin exprimée dans le repère lié au véhicule automobile, ${}^{veh}\theta_{BASSIN}(t)$ l'orientation spatiale du bassin exprimée, à chaque instant, dans le repère lié au véhicule automobile, ${}^{BASSIN}L5(t)$ la position de L5 exprimée, à chaque instant, dans le repère lié au bassin, ${}^{BASSIN}T_{Tete}(t) = {}^{BASSIN}T_1(t) \times {}^1T_2(t) \times \dots \times {}^5T_{Tete}(t)$ la matrice homogène définissant le repère lié à la tête par rapport au repère de base celle du bassin et d'origine L5.

L'animation du mouvement d'entrée nécessite de connaître :

- ${}^{veh}BASSIN(t)$: la position tridimensionnelle de l'origine du repère lié au bassin dans le repère lié au véhicule automobile à chaque instant t.
- ${}^{veh}\theta_{BASSIN}(t)$: les 3 angles décrivant l'orientation spatiale du bassin dans le repère lié au véhicule automobile à chaque instant t.
- ${}^{BASSIN}H(t)$: la position tridimensionnelle de la hanche H définie dans le repère lié au bassin.
- ${}^{BASSIN}L5(t)$: la position tridimensionnelle de L5 définie dans le repère lié au bassin.
- ${}^{BASSIN}T_{Tete}(t)$: la matrice homogène définissant le passage du repère lié au bassin au repère lié à la tête à chaque instant t. Pour cela, chaque matrice de transformation homogène ${}^{BASSIN}T_1(t)$, ${}^1T_2(t)$, ..., ${}^6T_{Pied}(t)$ doivent être calculées ou encore les matrices ${}^{BASSIN}T_3(t)$, ${}^3T_5(t)$ et ${}^5T_{Pied}(t)$ où ${}^{BASSIN}T_3(t)$ est la matrice homogène définissant le passage du repère du pelvis au repère lié à la cuisse, ${}^3T_5(t)$ la matrice homogène définissant le passage du repère lié à la cuisse au repère

lié à la jambe, ${}^5T_{\text{Pied}}(t)$ la matrice homogène définissant le passage du repère lié à la jambe au repère lié au pied. En d'autres termes, ceci suppose connu pour chaque segment corporel, d'une part, les 2 ou 3 angles décrivant son orientation spatiale par rapport à son segment juste proximal et d'autre part, sa longueur segmentaire.

- ${}^{\text{BASSIN}}T_{\text{Pied}}(t)$: la matrice homogène définissant le passage du repère lié au bassin au repère lié au pied à chaque instant t .

Ces données nécessaires à l'animation du mouvement d'entrée sont extraites de la base de mouvements « exploitables » (cas du mouvement mesuré) ou sont « prédites » par la méthodologie mise en œuvre (cas du mouvement prédit).

2.4.5 Conclusion

L'humanoïde de synthèse retenu est composé d'un corps de référence, le bassin et de trois chaînes cinématiques simples ouvertes qui lui sont connectées. Ces dernières représentent les 2 membres inférieurs et la chaîne réunissant le haut du tronc et la tête. La description de ces 3 chaînes ouvertes utilise la convention de Denavit et Hartenberg (Denavit et Hartenberg, 1955) qui naturellement nous amène à utiliser les matrices de transformation homogène. L'animation du mouvement d'entrée de l'humanoïde nécessite de disposer de la position tridimensionnelle du bassin, de son orientation, de la position des hanches et de la 5^{ème} vertèbre lombaire (L5), ainsi que l'orientation de chaque segment corporel par rapport à son segment juste proximal.

2.5 ANALYSE DE DONNEES ET IDENTIFICATION DES STRATEGIES MOTRICES D'ENTREE DANS UN VEHICULE AUTOMOBILE

Pour mener ce travail, nous proposons une démarche méthodologique qui tire son inspiration des travaux de Park et al. (Park et al., 2005) et de Lempereur (Lempereur, 2006). Celle-ci permet de d'identifier de manière automatique les stratégies et sous stratégies d'entrée dans un véhicule automobile suivant 4 étapes (Cf. Fig. 2.5):

- calcul des indices 3BJCV du mouvement d'entrée (étape a),
- identification des principales stratégies du mouvement d'entrée à partir des indices 3BJCV (étape b),
- calcul des angles articulaires « pertinents » (étape c),
- identification des sous stratégies à partir des angles articulaires « pertinents » (étape d).

Les différentes étapes de notre démarche sont développées dans les paragraphes suivants. Nous renvoyons le lecteur à l'Annexe A.2.2 pour une description plus détaillée de l'Analyse Factorielle en Composante Multiple (AFCM) et de la Classification Ascendante Hiérarchique (CAH).

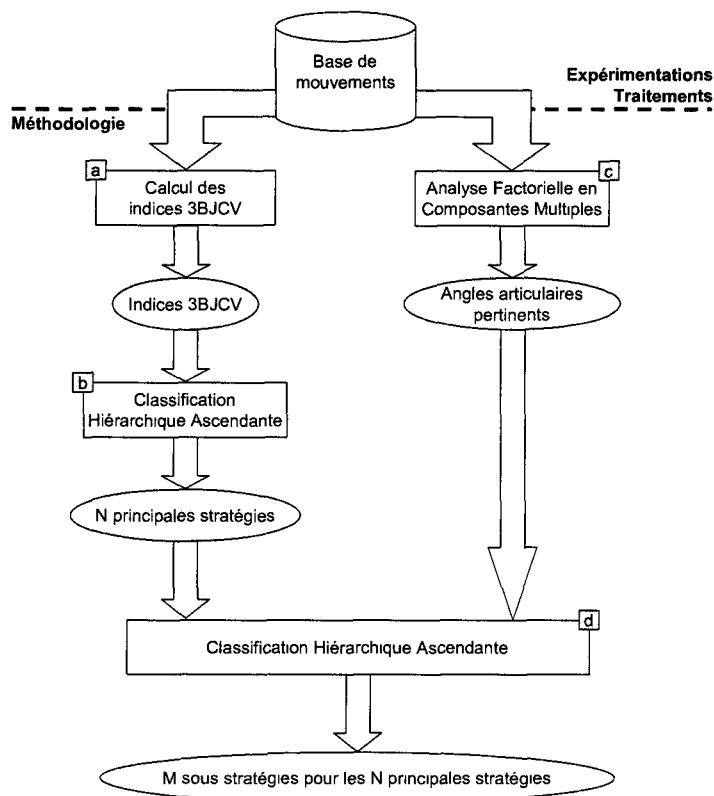


Figure 2 5. Démarche proposée pour identifier les stratégies motrices pour entrer dans un véhicule automobile.

2.5.1 Calcul des indices 3BJCV du mouvement d'entrée

Le calcul des indices 3BJCV repose sur une adaptation de la méthode de Park et al. (Park et al., 2005) pour les mouvements plus complexes, comme le mouvement d'entrée dans un véhicule automobile. Au lieu de considérer les effecteurs habituels (les mains, les pieds...), qui accomplissent une tâche donnée (atteinte, soulever de charge...), le milieu des 2 hanches (MPH, Cf. Fig. 2.2) est considéré comme effecteur. En effet, ce point est voisin du centre de gravité du corps (Winter, 1990), qui lui-même est considéré par Way et al. (Way et al., 2003) comme le point à positionner à l'intérieur du véhicule automobile durant le mouvement d'entrée dans un véhicule automobile. Dans ces conditions, les extrémités des membres inférieurs et de la tête sont considérées temporairement comme les racines des 3 chaînes cinématiques ouvertes de notre humanoïde. Les angles articulaires expriment dans ce cas l'orientation spatiale des corps proximaux par rapport à leurs corps immédiatement distaux. La configuration spatiale de chaque chaîne cinématique est alors représentée à l'aide d'un vecteur angulaire défini par $\theta(t) = [\theta_1(t) \dots \theta_j(t) \dots \theta_J(t)]^T$ (avec $J = 7$ pour les chaînes « Membre Inférieur » et $J = 6$ pour la chaîne « Tronc + Tête »). Le calcul des indices 3BJCV est réalisé en plusieurs étapes : la reconstruction de la position spatiale de MPH, le calcul des

contributions de chaque degré de liberté (DDL) dans le positionnement de MPH, la normalisation des contributions et enfin la construction des indices 3BJCV.

- *La reconstruction de la position spatiale de MPH*

Cette reconstruction considère prescrite la position spatiale de l’origine (le point milieu entre le 1^{er} et le 5^{ème} métatarses pour les racines « Pied », le point milieu des 2 tempes pour la racine « Tête ») du repère lié à la racine, ainsi que l’orientation spatiale de la racine (le pied droit, le pied gauche ou la tête selon la chaîne considérée) à chaque pas de temps. La position spatiale de MPH est extraite de l’équation [2.8].

$${}^{Veh}T_{BASSIN}(t) = Trans({}^{Veh}Racine_N(t)) \times Rot({}^{Veh}\theta_{Racine_N}(t)) \times Trans({}^{Racine_N}X(t)) \times {}^{Racine_N}T_{BASSIN}(t) \quad [2.8]$$

avec ${}^{Veh}T_{BASSIN}(t)$ la matrice de transformation homogène définissant, à chaque instant, le repère lié au bassin par rapport au repère lié au véhicule automobile, ${}^{Veh}Racine_N(t)$ la position, à chaque instant, de la Racine_N (N=1 pour le pied droit, N=2 pour le pied gauche et N=3 pour la tête) exprimée dans le repère lié au véhicule automobile, ${}^{Veh}\theta_{Racine_N}(t)$ l’orientation spatiale de la Racine_N exprimée, à chaque instant, dans le repère lié au véhicule automobile, ${}^{Racine_N}X(t)$ la position de chaque cheville et de « C7 » exprimée, à chaque instant, dans le repère lié à la Racine_N, ${}^{Racine_N}T_{BASSIN}(t) = {}^{Racine_N}T_1(t) \times {}^1T_2(t) \times \dots \times {}^J T_{BASSIN}(t)$ (avec J=6 pour la chaîne « Membre Inférieur » et J=5 pour la chaîne « Tronc + Tête ») matrice homogène définissant le repère lié au bassin par rapport au repère de base celle de la Racine_N et d’origine la cheville ou C7 selon la chaîne considérée.

- *Le calcul des contributions*

Les contributions spatiales du i^{ème} degré de liberté sont données par les équations [2.9], [2.10] et [2.11] (Park et al., 2005).

$$C_x^i = \int_{t=0}^{T_f} (x(t) - x^i(t)) dt \quad [2.9]$$

$$C_y^i = \int_{t=0}^{T_f} (y(t) - y^i(t)) dt \quad [2.10]$$

$$C_z^i = \int_{t=0}^{T_f} (z(t) - z^i(t)) dt \quad [2.11]$$

avec t=0 l’instant initial du mouvement d’entrée (décollement du pied droit du sol avant son positionnement sur le plancher) et T_f l’instant final du mouvement d’entrée (décollement du pied gauche du sol avant son positionnement sur le plancher) (Cf.

Chapitre 3), $[x(t) \ y(t) \ z(t)]^T$ et $[x'(t) \ y'(t) \ z'(t)]^T$ les coordonnées spatiales reconstruites de MPH pour les angles articulaires $\theta(t)$ et $\theta'(t)$ respectivement, où :

$$\theta'(t) = \begin{cases} \theta_j(t) & \text{Si } i \neq j \\ \theta_j(0) & \text{Si } i = j \end{cases} \quad \forall t \in [0, T_f] \quad [2.12]$$

- *La normalisation des contributions*

Ces contributions spatiales sont ensuite normalisées sur l'intervalle [-100, 100] à l'aide des équations [2.13], [2.14] et [2.15].

$$PC_x^i = 100 \times \frac{C_x^i}{\sum_{j=1}^J |C_x^j|} \quad [2.13]$$

$$PC_y^i = 100 \times \frac{C_y^i}{\sum_{j=1}^J |C_y^j|} \quad [2.14]$$

$$PC_z^i = 100 \times \frac{C_z^i}{\sum_{j=1}^J |C_z^j|} \quad [2.15]$$

- *La construction des indices 3BJCV*

Puis, les vecteurs JCV sont définis selon [2.16], [2.17] et [2.18].

$$JCV_x^N = [PC_x^1 \dots PC_x^J] \quad [2.16]$$

$$JCV_y^N = [PC_y^1 \dots PC_y^J] \quad [2.17]$$

$$JCV_z^N = [PC_z^1 \dots PC_z^J] \quad [2.18]$$

avec $J = 10$ pour les chaînes « Membre Inférieur » (7 DDL de la chaîne + 3 DDL de l'orientation spatiale de la base par rapport au repère véhicule) et $J = 9$ pour la chaîne « Tronc + Tête » (6 DDL de la chaîne + 3 DDL de l'orientation spatiale de la base par rapport au repère véhicule), $N=1$ pour le pied droit, $N=2$ pour le pied gauche et $N=3$ pour la tête.

Nous définissons les vecteurs JCV_{RLL} , JCV_{LLL} et JCV_H à l'aide des équations [2.19], [2.20] et [2.21].

$$JCV_{RLL} = [JCV_x^1 \ JCV_y^1 \ JCV_z^1] \quad [2.19]$$

$$JCV_{LLL} = [JCV_x^2 \ JCV_y^2 \ JCV_z^2] \quad [2.20]$$

$$JCV_H = [JCV_x^3 \ JCV_y^3 \ JCV_z^3] \quad [2.21]$$

avec JCV_{RLL} l'indice JCV de la chaîne « Membre Inférieur » droit (Right Lower Limb), JCV_{LLL} l'indice JCV de la chaîne « Membre Inférieur » gauche (Left Lower Limb) et JCV_H l'indice JCV de la chaîne « Tronc+ Tête » (Head).

Enfin, nous définissons pour chaque mouvement d'entrée le vecteur $3BJCV$ (1×87) comme la concaténation des vecteurs JCV_{RLL} , JCV_{LLL} et JCV_H , défini par l'équation [2.22].

$$3BJCV = [JCV_{RLL} \ JCV_{LLL} \ JCV_H] \quad [2.22]$$

A chaque mouvement d'entrée dans un véhicule automobile est donc associé un indice $3BJCV$.

2.5.2 Détermination des stratégies principales du mouvement d'entrée

Une Classification Hiérarchique Ascendante (CHA) est ensuite appliquée aux indices $3BJCV$ afin de déterminer les stratégies principales du mouvement d'entrée dans un véhicule automobile. La CHA est appliquée aux tableaux de données formés des X colonnes correspondant aux X sujets expérimentés et des 87 lignes correspondant aux valeurs des $3BJCV$ calculés par sujet. La distance d'agrégation du lien direct, dite encore la technique du lien complet (« *complete linkage* »), qualifiée encore de lien du voisin le plus distant (« *furthest neighbor* »), est retenue pour réaliser cette classification. La distance d'agrégation est définie par l'équation [2.23].

$$D(A, B) = \max_{a \in A, b \in B} (d(a, b)) \quad [2.23]$$

Avec d la distance entre les éléments a et b appartenant respectivement aux groupes A et B (Cf. Annexe A.2.2).

2.5.3 Détermination des angles articulaires pertinents du mouvement d'entrée

En parallèle, une Analyse Factorielle des Correspondances Multiples (AFCM) est appliquée aux angles articulaires (centrés réduits, Cf. Chapitre 3) pour définir l'orientation spatiale de chaque chaîne cinématique ouverte avec cette fois le bassin comme racine et le point milieu du 1^{er} et 5^{ème} métatarse du pied droit ou gauche ou le milieu des 2 tempes comme effecteurs. Contrairement à l'étape a, les angles articulaires utilisés à cette étape expriment donc l'orientation spatiale des corps distaux par rapport à leur corps immédiatement proximal. L'AFCM est appliquée à trois tableaux de données (1 tableau par chaîne) formés de 7, 7 et 6 colonnes correspondant aux 20 DDL de notre modèle et à $X \times 50$ lignes (avec X le nombre de sujets expérimentés, 50 étant le nombre de valeurs angulaires retenus par mouvement d'entrée) correspondant aux valeurs des angles articulaires extraits de la base de mouvements exploitables (Cf. Chapitre 3). L'AFCM est appliquée à chaque chaîne indépendamment des autres.

2.5.4 Détermination des sous stratégies du mouvement d'entrée

Enfin, une Classification Hiérarchique Ascendante est appliquée aux angles articulaires « pertinents » (déterminés à l'étape c) des sujets pour définir une même stratégie principale identifiée à l'étape b de la démarche proposée. La CHA est appliquée aux 6 tableaux (car appliquée à 2 véhicules) formés de P colonnes correspondant aux valeurs des P angles articulaires pertinents et de X×50 lignes (avec X le nombre de sujets expérimentés pour la stratégie étudiée). La distance d'agrégation utilisée est à nouveau la distance d'agrégation du voisin le plus distant (« *Furthest neighbor* ») (Cf. Annexe A.2.2).

2.5.5 Conclusion

Pour identifier et caractériser les classes de mouvement d'entrée dans un véhicule automobile, une démarche automatique de calcul est proposée. Celle-ci est inspirée des travaux de Park et al. (Park et al., 2005) et de Lempereur (Lempereur, 2006). Une première étape consiste à faire une première classification sur de nouveaux indices nommés les 3BJCV. Ceux-ci s'inspirent des travaux de Park et al. (Park et al., 2005) dans lesquels la complexité du mouvement d'entrée dans un véhicule automobile a été prise en compte. La deuxième étape, de la même manière que dans les travaux de Lempereur (Lempereur, 2006), exploite une Analyse Factorielle en Composante Multiple (AFCM) sur les angles articulaires centrés réduits (Cf. Chapitre 3) afin d'en dégager les variables articulaires « pertinentes ». Une Classification Hiérarchique Ascendante (CHA) est ensuite appliquée aux mouvements des différents sujets en fonction des variables articulaires « pertinentes » identifiées, en vue d'identifier des stratégies et des sous stratégies d'entrée dans un véhicule automobile.

Les stratégies et sous stratégies de mouvement étant identifiées, l'étape suivante consiste à développer un simulateur des mouvements d'entrée pour un sujet (issus de la base de mouvements) dans un véhicule de géométrie définie par l'utilisateur.

2.6 SIMULATEUR DU MOUVEMENT D'ENTREE DANS UN VEHICULE AUTOMOBILE

Cette étape vise à développer le simulateur permettant la simulation cinématique du mouvement d'entrée d'un humanoïde de synthèse (constitué ici d'une tête, d'un tronc, d'un bassin et des membres inférieurs) dans des habitacles de tailles variables. Le premier paragraphe présente le travail préparatoire, qui précède la simulation, et qui complète la base de mouvements exploitables. Le deuxième paragraphe détaille la démarche de simulation. Le troisième paragraphe présente la méthode retenue pour vérifier la stratégie du mouvement simulé. Enfin, le quatrième paragraphe propose une procédure pour évaluer la robustesse du simulateur.

2.6.1 Travail préparatoire

L'objectif du travail préparatoire est d'augmenter la base de mouvements « exploitables » par des données supplémentaires (extraites des mouvements mesurés) nécessaires à l'élaboration du processus de simulation. Ce travail consiste à définir :

- 1) les zones d'influence sur le véhicule expérimental*,
- 2) les instants d'interaction,
- 3) les points caractéristiques,
- 4) les coordonnées des points caractéristiques dans les repères liés aux zones d'influence.

2.6.1.1 Définition des zones d'influence

Une zone d'influence est une partie du véhicule automobile, qui par expertise (Dufour et Wang, 2005), influe sur le mouvement d'entrée. Quatre zones d'influence sont considérées dans la présente étude : le bavolet*, le plancher*, le brancard* et le siège. A chaque zone d'influence est attachée un repère local (Cf. Fig. 2.6) :

- 1) Au siège est attaché le repère (R_s, O_s, X_s, Y_s, Z_s) dit repère « objectif ». Ce repère est nommé ainsi car, selon Way et al. (Way et al., 2003), entrer dans un véhicule automobile revient à placer le bassin sur le siège.
- 2) Au bavolet, au brancard et au plancher sont attachés des repères dont la base est identique à celle du repère « objectif ». Seul change l'origine du repère (Cf. Fig. 2.6).

Enfin, un repère, nommé « repère sol », est défini au bord du véhicule. Sa base est également celle du repère « objectif ». Son origine est le projeté (selon l'axe Z) au sol de l'origine du repère lié au bavolet.

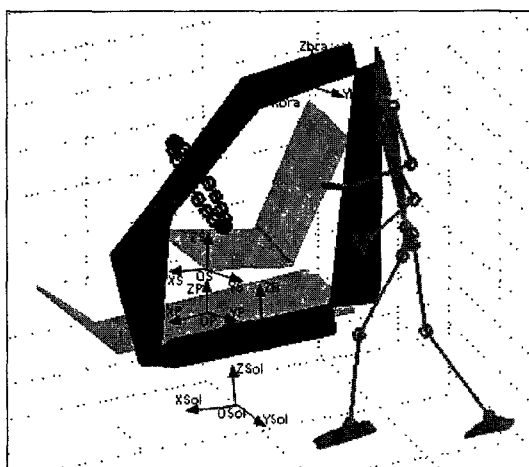


Figure 2 6. Définition des repères associés aux zones d'influence.

Avec :

$R_{bra}(O_{bra}, X_{bra}, Y_{bra}, Z_{bra})$: repère lié à la zone d'influence brancard*
$R_p(O_p, X_p, Y_p, Z_p)$: repère lié à la zone d'influence plancher*
$R_B(O_B, X_B, Y_B, Z_B)$: repère lié à la zone d'influence bavolet*
$R_{Sol}(O_{Sol}, X_{Sol}, Y_{Sol}, Z_{Sol})$: repère lié au sol.

2.6.1.2 Définition des instants caractéristiques

Un instant caractéristique est par définition un « instant » qui marque une interaction du sujet avec une zone d'influence ou le sol. Ces instants caractéristiques découpent le mouvement d'entrée en sous-phases. Les instants caractéristiques dépendent de la stratégie d'entrée considérée. Pour les 2 principales stratégies d'entrée (Cf. Chapitre 1), nous retenons :

- *Stratégie d'entrée à un seul pied*

Sept instants caractéristiques sont considérés pour la stratégie d'entrée à un pied. Ils sont le résultat de notre observation du mouvement d'entrée et/ou tirés de Dufour et Wang (Dufour et Wang, 2005). Les sept instants caractérisant la stratégie d'entrée à un pied sont les suivants :

- 1) Décollement du pied droit du sujet du sol avant son positionnement à l'intérieur du véhicule automobile (début du mouvement d'entrée) (Cf. Chapitre 3).
- 2) Passage du pied droit du sujet au dessus du bavolet*.
- 3) Passage du genou droit du sujet au plus près du volant.
- 4) Passage du bassin du sujet au plus près du pied milieu* de véhicule.
- 5) Premier passage du bassin du sujet à la hauteur du siège du véhicule.
- 6) Passage de la tête du sujet au dessous du brancard*.
- 7) Décollement du pied gauche du sujet du sol avant son positionnement à l'intérieur du véhicule automobile (fin du mouvement d'entrée) (Cf. Chapitre 3).

Notons que l'ordre chronologique d'occurrence de ces instants caractéristiques peut différer d'une sous-stratégie à une autre (Dufour et Wang, 2005). La figure 2.7 représente les instants caractéristiques de la stratégie d'entrée à un pied. La sous stratégie représentée sur la figure est la stratégie « Lateral Sliding » (LS) (Cf. Chapitre 1).

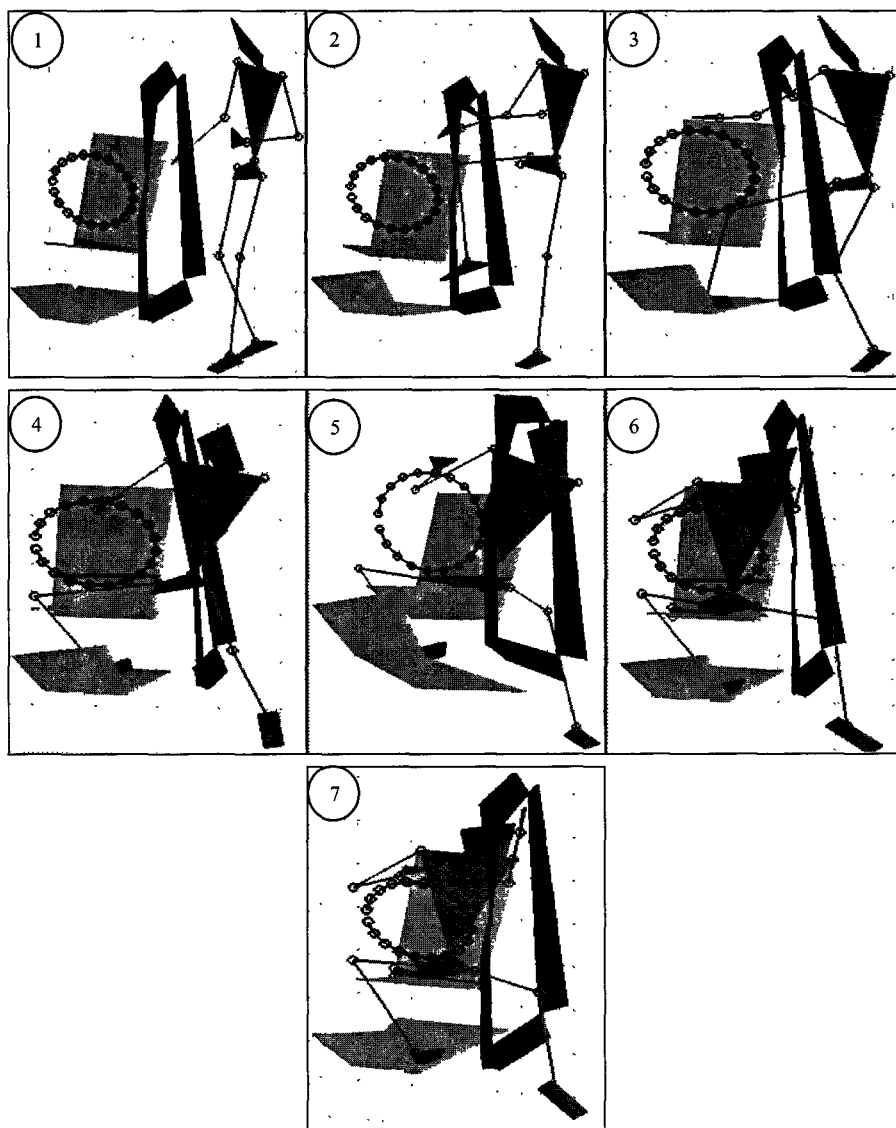


Figure 2.7. Les sept instants caractéristiques de la stratégie d'entrée à un pied (la sous stratégie représentée ici correspond à la stratégie LS, Cf. Chapitre 1).

- *Stratégie d'entrée à deux pieds*

Quatre instants caractéristiques sont considérés pour la stratégie d'entrée à deux pieds. Ils sont le résultat de notre observation du mouvement d'entrée. Les quatre instants caractérisant la stratégie d'entrée à deux pieds sont les suivants :

- 1) Premier décollement du pied droit du sujet du sol (début du mouvement d'entrée) (Cf. Chapitre 3).
- 2) Pose du pied droit sur le sol et positionnement du sujet dos au véhicule.
- 3) Pose du bassin du sujet sur le siège du véhicule.
- 4) Décollement du pied gauche (ou bien des deux pieds simultanément) du sujet du sol avant son (leur) positionnement(s) à l'intérieur du véhicule automobile (fin du mouvement d'entrée) (Cf. Chapitre 3).

Contrairement à la stratégie d'entrée à un pied, l'ordre d'occurrence des instants caractéristiques est toujours le même quelque soit la sous stratégie considérée (Cf. Chapitre 4). La figure 2.8 représente les différents points caractéristiques de la stratégie d'entrée à deux pieds.

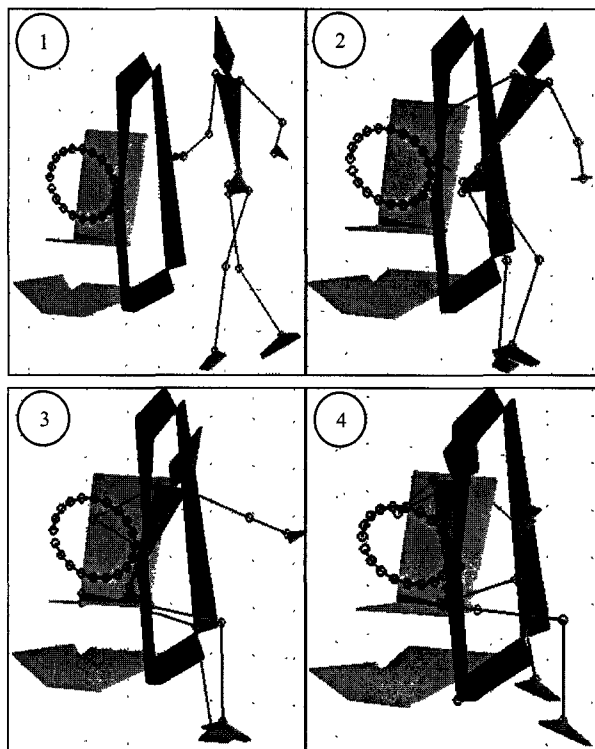


Figure 2.8. Les quatre instants caractéristiques de la stratégie d'entrée à deux pieds.

2.6.1.3 Choix des points caractéristiques

Les points caractéristiques sont des points appartenant à notre humanoïde (Cf. Fig. 2.2). Sept points caractéristiques sont retenus pour notre étude : la limite distale de la tête (le vertex), la hanche droite, la hanche gauche, L5, MPH (milieu des 2 hanches), le point milieu entre le 1^{er} et le 5^{ème} métatarse du pied droit (dit « bout pied droit ») et le point milieu entre le 1^{er} et le 5^{ème} métatarse du pied gauche (dit « bout pied gauche ») (Cf. Fig. 2.9).

Par conséquent, pour la stratégie à 1 pied, le mouvement d'entrée est défini à l'aide de 147 coordonnées (7 instants caractéristiques × 7 points caractéristiques × 3 coordonnées), dites coordonnées caractéristiques. Pour la stratégie à 2 pieds, le mouvement d'entrée est défini à l'aide de 84 coordonnées caractéristiques (4 instants caractéristiques × 7 points caractéristiques × 3 coordonnées).

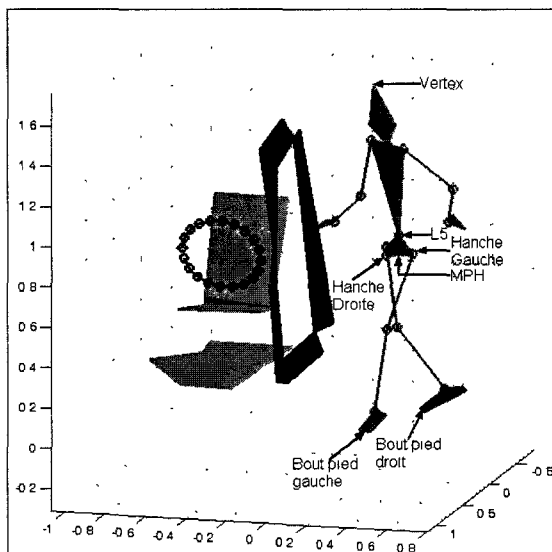


Figure 2.9. Les 7 points caractéristiques considérés dans l'étude.

A titre d'exemple la figure 2.10 explicite les coordonnées caractéristiques selon l'axe Z pour le « bout du pied droit » pour la sous stratégie d'entrée à un pied LS.

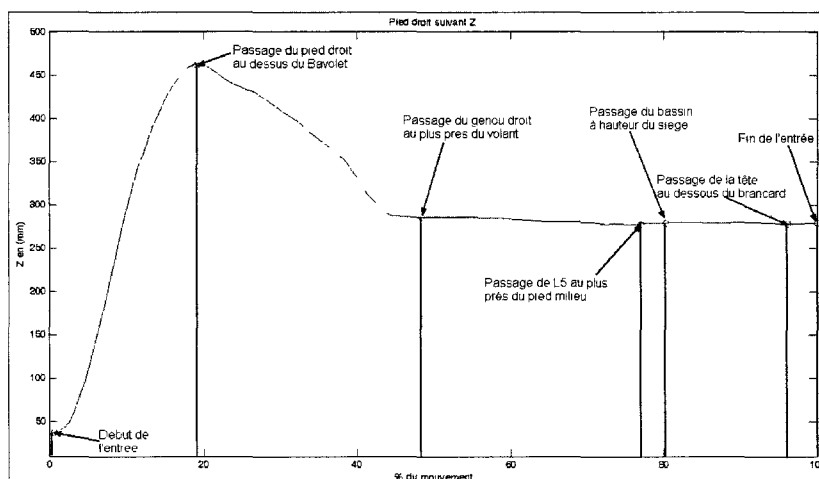


Figure 2.10. Coordonnées caractéristiques selon l'axe Z du «bout du pied droit » repérés pour la sous stratégie à un pied LS.

2.6.1.4 Coordonnées des points caractéristiques retenues pour la simulation

Avant toute interaction, les points caractéristiques sont exprimés dans le repère lié au sol. Dès la première interaction avec le véhicule, ces derniers sont exprimés dans les repères liés aux zones d'influence. Des règles sont définies pour déterminer ces zones d'influence.

- Si un segment corporel entre en interaction avec une zone d'influence, alors les points caractéristiques appartenant à ce segment corporel sont exprimés par rapport au repère lié à cette zone d'influence.

- Si un segment corporel n'est en interaction avec aucune zone d'influence, alors les points caractéristiques appartenant à ce segment corporel sont exprimés par rapport au repère « objectif ».

Notons, que compte tenu de ces règles, le repère objectif peut être retenu soit : 1) si le siège est zone d'influence ou 2) si il n'existe aucune zone d'influence.

Les tableaux 2.3 et 2.4 précise les repères dans lesquels les points caractéristiques ont été exprimés respectivement pour la stratégie à un pied et la stratégie à deux pieds.

	Inst. Caract. 1	Inst. Caract. 2	Inst. Caract. 3	Inst. Caract. 4	Inst. Caract. 5	Inst. Caract. 6	Inst. Caract. 7
Vertex	Sol	Brancard Objectif	Brancard Objectif	Brancard Objectif	Brancard Objectif	Brancard Objectif	Brancard Objectif
L5	Sol	Objectif	Objectif	Objectif	Objectif	Objectif	Objectif
Hanche droite	Sol	Objectif	Objectif	Objectif	Objectif	Objectif	Objectif
Hanche gauche	Sol	Objectif	Objectif	Objectif	Objectif	Objectif	Objectif
MPH	Sol	Objectif	Objectif	Objectif	Objectif	Objectif	Objectif
Bout Pied droit	Sol	Bavolet	Plancher	Plancher	Plancher	Plancher	Plancher
Bout Pied gauche	Sol	Sol	Sol	Sol	Sol	Sol	Sol

Tableau 2 3. Repères dans lesquels les points caractéristiques sont exprimés pour la stratégie à 1 pied.

	Inst. Caract. 1	Inst. Caract. 2	Inst. Caract. 3	Inst. Caract. 4
Vertex	Sol	Sol	Objectif	Brancard Objectif
L5	Sol	Sol	Objectif	Objectif
Hanche droite	Sol	Sol	Objectif	Objectif
Hanche gauche	Sol	Sol	Objectif	Objectif
MPH	Sol	Sol	Objectif	Objectif
Bout Pied droit	Sol	Sol	Sol	Sol
Bout Pied gauche	Sol	Sol	Sol	Sol

Tableau 2 4. Repères dans lesquels les points caractéristiques sont exprimés pour la stratégie à 2 pieds.

Par exemple, prenons la hanche droite (point caractéristique, Cf. §2.6.1.3), de coordonnées $HD_{L\text{ABE}}$, exprimée dans le repère de laboratoire (LABE le repère de laboratoire défini lors des expérimentations). Si la stratégie à 2 pieds est retenue, les coordonnées de la hanche droite à l'instant 3 viennent augmenter la base de mouvements « exploitables » sont extraits de [2.24].

$$HD_{\text{Objectif,Exp}}(t = \text{Ins tan } t3) = ({}^{L\text{ABE}}T_{\text{Objectif,Exp}})^{-1} \times HD_{L\text{ABE}}(t = \text{Ins tan } t3) \quad [2.24]$$

Compte tenu des hypothèses (Cf. §2.2.2), les coordonnées des points caractéristiques, exprimées dans les repères liés aux zones d'influence, sont constantes quelque soit le véhicule automobile sur lequel la simulation est réalisée. Par conséquent, les coordonnées obtenues, pour des expérimentations menées sur un premier véhicule (dit véhicule « expérimental ») peuvent être conservées pour la simulation dans un véhicule ayant une géométrie différente (dit véhicule de « simulation »).

2.6.2 Méthodologie de simulation du mouvement d'entrée dans un véhicule automobile

La méthodologie de simulation proposée se compose de trois étapes:

- 1) Calcul des coordonnées des points caractéristiques dans le repère de laboratoire dans lequel est localisé le véhicule de simulation. Ces points sont fonction de la géométrie du véhicule et de la stratégie de mouvement expérimental retenue pour la simulation.
- 2) Simulation des trajectoires des points caractéristiques pour le véhicule de simulation.
- 3) Calcul des angles articulaires et génération des mouvements.

2.6.2.1 Calcul des coordonnées des points caractéristiques pour le véhicule de simulation

L'objectif de cette étape est de calculer les coordonnées des points caractéristiques dans le repère de laboratoire dans lequel est localisé le véhicule de simulation. La démarche étant identique pour chaque point caractéristique (voir remarque ci-après), illustrons ce calcul par un exemple. Les coordonnées de la hanche droite dans le repère objectif du véhicule expérimental sont données en [2.24]. Selon l'hypothèse du §2.2.2, ces coordonnées sont également les coordonnées de la hanche droite dans le repère objectif du véhicule de simulation [2.25].

$$HD_{\text{Objectif,Sim}}(t = \text{Ins tan } t3) = HD_{\text{Objectif,Exp}}(t = \text{Ins tan } t3) \quad [2.25]$$

Par conséquent, les coordonnées de la hanche droite dans le repère de laboratoire dans lequel est localisé le véhicule de simulation, sont données en [2.26].

$$HD_{L\text{ABS}}(t = \text{Ins tan } t3) = ({}^{L\text{ABS}}T_{\text{Objectif,Sim}})({}^{L\text{ABE}}T_{\text{Objectif,Exp}})^{-1} \times HD_{L\text{ABE}}(t = \text{Ins tan } t3) \quad [2.26]$$

Remarque : le vertex à partir de l'instant 2 de la stratégie à un pied et à l'instant 4 de la stratégie à 2 pieds déroge à ce calcul.

Si Hauteur-Brancard-Simulation < Hauteur-Brancard-Expérimental :

$$V_{LABS}(t) = ({}^{LABS}T_{Brancard,Sim})({}^{LABE}T_{Brancard,Exp})^{-1} \times V_{LABE}(t)$$

Sinon :

$$V_{LABS}(t) = ({}^{LABS}T_{Objectif,Exp})({}^{LABE}T_{Objectif,Exp})^{-1} \times V_{LABE}(t)$$

2.6.2.2 Simulation des trajectoires sur le véhicule de simulation

Cette étape vise à « relier » les points caractéristiques calculés à l'étape précédente de sorte à former les trajectoires des points caractéristiques. Comme les points caractéristiques ne correspondent pas forcément à des extrema (minima ou bien maxima), une connaissance complémentaire est requise. La méthode retenue pour relier les points caractéristiques s'inspire de la méthode proposée par Zhang et al. (Zhang et al., 2002) pour modifier les angles articulaires et reprise par Lempereur (Lempereur, 2006) pour modifier les trajectoires. Cette méthode consiste à modifier une trajectoire donnée (trajectoire source) de telle sorte à la faire passer par les différents points calculés (Cf. Fig. 2.11).

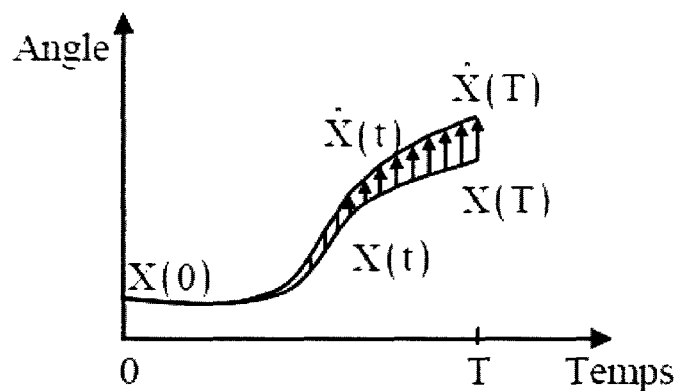


Figure 2 11. Déformation de la trajectoire source pour la faire passer par les points caractéristiques cibles.

Deux méthodes de rectification de trajectoires sont définies par Zhang et al. (Zhang et al., 2002), la méthode proportionnelle à l'amplitude de la trajectoire (AP) et la méthode proportionnelle au temps (TP). La méthode TP donne de bons résultats (Zhang et al., 2002).

L'expression mathématique de la méthode TP est donnée comme suit :

$$\hat{X}(t) = X(t) + \frac{t}{T} \left(\hat{X}(T) - X(T) \right) \quad [2.27]$$

La méthode est appliquée entre deux points successifs. Soient deux points caractéristiques (de la simulation), A (point initial) et B (point final) et soit une trajectoire de référence (expérimentale). La Méthode est appliquée deux fois pour faire passer la trajectoire par les deux points. Dans un premier temps, elle est appliquée de telle sorte que la trajectoire de référence passe par le point B. Dans un deuxième temps la trajectoire obtenue lors de la première application de la méthode est utilisée comme trajectoire de référence pour la faire passer par le point A (Cf. Fig. 2.12 et Fig. 2.13).

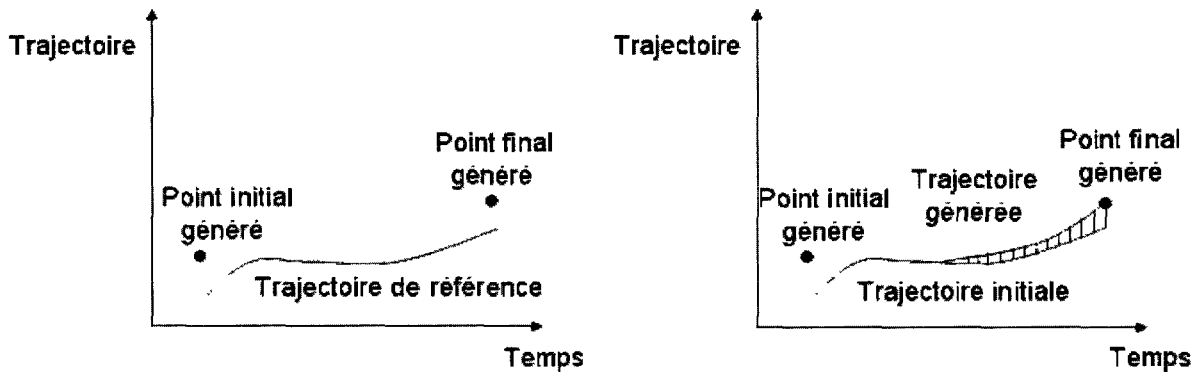


Figure 2 12. Première adaptation pour satisfaire le point final.

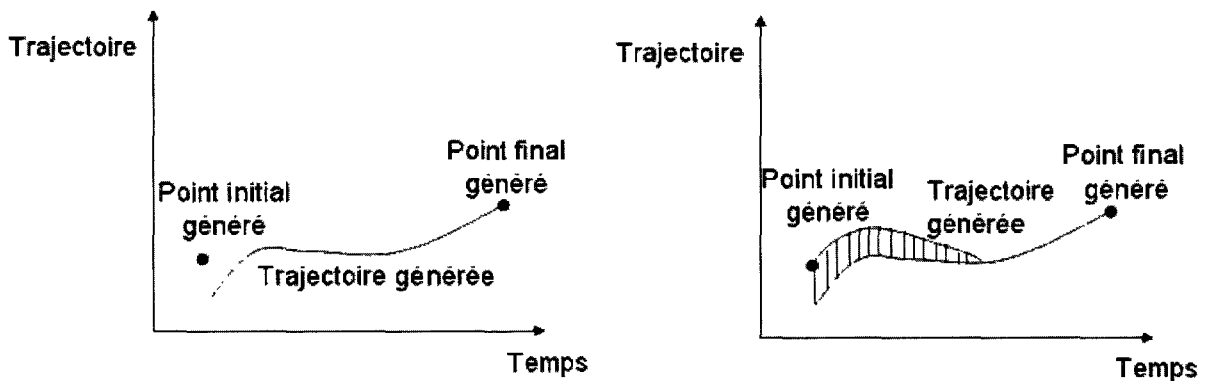


Figure 2 13. Deuxième adaptation pour satisfaire le point initial.

Les adaptations sont effectuées entre deux points caractéristiques successifs. Pour les mouvements de la stratégie d'entrée à un pied 12 adaptations sont réalisées pour chaque coordonnée X, Y et Z des points caractéristiques. Pour les mouvements de la stratégie d'entrée à deux pieds 6 adaptations sont réalisées pour chaque coordonnées X, Y et Z des points caractéristiques.

Les trajectoires simulées dans la présente étape constituent, avec l'anthropométrie du sujet, les entrées de la procédure de calcul des angles articulaires, qui fait l'objet du prochain paragraphe.

2.6.2.3 Génération des mouvements

L'objectif de cette étape est la génération du mouvement d'entrée au véhicule automobile. Le problème consiste à trouver les angles articulaires qui permettent aux pieds, au bassin et à la tête de suivre « au mieux » leurs trajectoires prescrites (Cf. § 2.6.2.2). Ce problème se formule sous la forme d'un problème de cinématique inverse. Pour sa résolution un programme d'optimisation est développé.

- **Formulation du problème**

Le problème de cinématique inverse est formulé comme un problème d'optimisation (Cf. Chapitre 1). L'optimisation vise à minimiser à chaque pas de temps la somme des distances euclidiennes entre les trajectoires courantes et les trajectoires désirées (prescrites). Les trajectoires désirées, correspondent aux trajectoires des points caractéristiques (bout pied gauche, bout pied droit, hanche droite, hanche gauche, MPH, L5 et vertex). Les trajectoires courantes sont obtenues à l'aide du Modèle Géométrique Direct (Cf. §2.4.3).

La formulation mathématique de ce problème d'optimisation est donnée par l'expression suivante :

$$\min \sum_{i=1}^N \|X_{di}(t) - X_i(t)\| = \min \sum_{i=1}^N \|X_{di}(t) - f_i(\theta_{j,Sim}(t))\| \quad [2.28]$$

Avec N le nombre de points caractéristiques (N= 7 dans notre étude). $\|\cdot\|$ le symbole de la norme euclidienne. $\theta_{j,Sim}$ les angles articulaires recherchés (avec j=1...7 pour la chaîne « Membre Inférieur » et j=1... 6 pour la chaîne « Tronc + Tête »), f_i la partie du modèle géométrique direct donnant la position de chaque point caractéristique considéré (Cf. §2.4.3). X_{di} correspondent aux trajectoires désirées (prescrites).

Le problème d'optimisation présenté ci-dessus est soumis à des contraintes liées à la stratégie retenue pour la simulation et des contraintes d'évitement de collision. Pour avoir des mouvements « respectueux » de la stratégie à simuler, quatre contraintes articulaires sont imposées aux angles articulaires calculés et deux autres contraintes d'évitement de collision sont imposées. Le problème d'optimisation s'écrit comme suit :

$$\min \sum_{i=1}^N \|X_{di}(t) - f_i(\theta_{j,Sim}(t))\|$$

$$\left\{ \begin{array}{l}
 S.C. \quad \begin{cases} -\theta_{j,Sim}(t) < -\theta_{j,Sim}(t-1) \text{ si } \theta_{j,Exp}(t-1) \leq \theta_{j,Exp}(t) \\ \theta_{j,Sim}(t) < \theta_{j,Sim}(t-1) \text{ si } \theta_{j,Exp}(t) \leq \theta_{j,Exp}(t-1) \end{cases} \\
 S.C. \quad \theta_{j\min} \leq \theta_{j,Sim}(t) \leq \theta_{j\max} \\
 S.C. \quad |\theta_{j,Exp}(t) - \theta_{j,Sim}(t)| \leq \varepsilon_j \\
 S.C. \quad |\theta_{j,Sim}(t) - \theta_{j,Sim}(t-1)| \leq V_j \\
 S.C. \quad \begin{cases} \text{si } aX_{GDV}(t) + bY_{GDV}(t) + cZ_{GDV}(t) + d = 0 \\ \text{alors } X_{GDV}^2(t) + Y_{GDV}^2(t) \geq R_v^2 \end{cases} \\
 S.C. \quad \begin{cases} \text{si } (aX_{GDS}(t) + bY_{GDS}(t) + cZ_{GDS}(t) + d = 0) \text{ et } \text{si } (Y_{GDS} \leq 0) \\ \text{alors } X_{GDS} \geq 0 \end{cases}
 \end{array} \right. \quad [2.29]$$

La première contrainte impose aux angles recherchés (les angles articulaires dans le véhicule cible) et à l'orientation spatiale du bassin de suivre « l'allure » de ceux du mouvement de référence (expérimental).

La deuxième contrainte impose aux angles articulaires recherchés (les angles articulaires dans le véhicule cible) de se situer dans les marges d'amplitudes admissibles d'un point de vue physiologique (Kapandji, 1974).

La troisième contrainte impose la stratégie retenue pour la simulation en imposant aux angles recherchés et à l'orientation spatiale du bassin de suivre les angles articulaires et l'orientation spatiale du bassin du mouvement obtenu sur le véhicule expérimental. Les ε_j concernent le taux de « relâchement admissible » des angles recherchés et de l'orientation spatiale du bassin. Le choix des ε_j est guidé par l'analyse des mouvements de la base mouvements exploitables (Cf. Annexe A.2.3).

La quatrième contrainte concerne la continuité des angles articulaires recherchés et de l'orientation spatiale du bassin. Cette contrainte permet d'éviter d'éventuelles discontinuités qui peuvent apparaître sur les angles articulaires et cela entre deux instants successifs. V_j est la variation maximale autorisée pour un angle articulaire recherché entre deux instants successifs. Les variations maximales des angles articulaires dépendent des sujets et de la stratégie motrice adoptée (Cf. Chapitre 4).

La cinquième et la sixième contrainte concernent l'évitement de collision du genou droit avec le volant et le siège. En effet, le genou droit est le seul point caractéristique qui n'est pas soumis aux contraintes (Cf. §2.6.1.3). De plus, les contraintes articulaires imposées à ses angles articulaires sont relativement importantes (Cf. Annexe A.2.3). Par conséquent, il risque d'entrer en collision avec des parties du véhicule comme le volant et/ou le siège. Pour

s'affranchir de cette situation des contraintes d'évitement d'obstacle sont imposées à la trajectoire du genou droit.

- **Evitement de collision avec le volant**

Pour éviter que le genou droit entre en collision avec le volant, il lui est imposé de ne pas traverser l'aire définie par le volant.

Nous supposons que le volant forme un disque. Un repère local est associé au volant (Cf. Fig. 2.14). L'origine du repère correspond au centre du volant. Ce repère permet de définir le plan du volant. A chaque pas de temps les coordonnées du genou sont projetées sur le plan du volant. Pour que le genou droit ne pénètre pas dans le volant, il faut que ces coordonnées vérifient la condition suivante :

$$si \quad aX_{GDV}(t) + bY_{GDV}(t) + cZ_{GDV}(t) + d = 0$$

$$Alors \quad X_{GDV}^2(t) + Y_{GDV}^2(t) \geq R_v^2$$

Avec

$$aX_{GDV}(t) + bY_{GDV}(t) + cZ_{GDV}(t) + d = 0 : \text{L'équation du plan du volant.}$$

$X_{GDV}(t)$: L'expression de la coordonnée du genou droit suivant X dans le repère associé au volant à chaque pas de temps.

$Y_{GDV}(t)$: L'expression de la coordonnée du genou droit suivant Y dans le repère associé au volant à chaque pas de temps.

$Z_{GDV}(t)$: L'expression de la coordonnée du genou droit suivant Z dans le repère associé au volant à chaque pas de temps.

$X_{GDV}(t), Y_{GDV}(t)$ et $Z_{GDV}(t)$ sont obtenus à partir de l'équation suivante :

$$GD_V(t) = ({}^L T_V)^{-1} \times GD_L(t)$$

Avec :

$GD_V(t)$: Coordonnées suivant X, Y et Z du genou droit dans le repère lié au volant à chaque pas de temps.

$GD_L(t)$: Coordonnées suivant X, Y et Z du genou droit dans le repère lié au laboratoire à chaque pas de temps.

${}^L T_V$: Matrice de transformation homogène permettant le passage du repère laboratoire vers le repère lié au volant.

R_v : Rayon du volant.

- **Evitement de collision avec le siège**

Pour éviter que le genou droit entre en collision avec le siège, il lui est imposé de ne pas traverser l'aire définie par le siège. Un repère local est associé au siège (Cf. Fig. 2.14). Ce repère permet de définir le plan du siège. Les coordonnées du genou droit sont projetées sur le plan du siège à chaque pas de temps. Pour que le genou droit ne pénètre pas dans le siège, il faut que ces coordonnées vérifient les conditions suivantes :

$$\text{si } (aX_{GDS}(t) + bY_{GDS}(t) + cZ_{GDS}(t) + d = 0) \text{ et si } (Y_{GDS}(t) \leq 0)$$

$$\text{alors } X_{GDS}(t) \geq 0$$

Avec

$aX_{GDS}(t) + bY_{GDS}(t) + cZ_{GDS}(t) + d = 0$: L'équation du plan du siège.

$X_{GDS}(t)$: L'expression de la coordonnée du genou droit suivant X dans le repère associé au siège à chaque pas de temps.

$Y_{GDS}(t)$: L'expression de la coordonnée du genou droit suivant Y dans le repère associé au siège à chaque pas de temps.

$Z_{GDS}(t)$: L'expression de la coordonnée du genou droit suivant Z dans le repère associé au siège à chaque pas de temps.

$X_{GDS}(t)$, $Y_{GDS}(t)$ et $Z_{GDS}(t)$ sont obtenus à partir de l'équation suivante :

$$GD_S(t) = ({}^L T_S)^{-1} \times GD_L(t)$$

Avec :

$GD_S(t)$: sont les coordonnées suivant X, Y et Z du genou droit dans le repère lié au siège à chaque pas de temps.

$GD_L(t)$: sont les coordonnées suivant X, Y et Z du genou droit dans le repère lié au laboratoire à chaque pas de temps.

${}^L T_S$: La matrice de transformation homogène permettant le passage du repère laboratoire vers le repère siège.

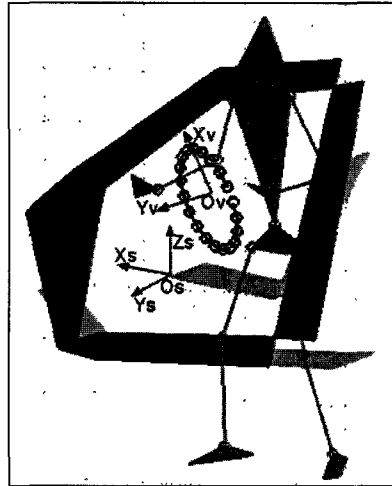


Figure 2 14. Définition des repères sur le volant et le siège.

Le fait de déterminer des points caractéristiques à des instants bien spécifiques (Cf. §2.6.1.3) permet aux différents segments corporels d'éviter la collision avec les différentes parties du véhicule automobile.

2.6.3 Evaluation des mouvements simulés

L'objectif de cette étape est de vérifier l'appartenance du mouvement simulé à la stratégie désirée. Dans un premier temps, pour chaque stratégie identifiée un représentant est déterminé. Puis, les distances séparant les angles pertinents (Cf. §2.5.3) du mouvement simulé avec les angles pertinents des sujets représentants des différentes stratégies sont calculées. Ces distances servent à classer le mouvement simulé parmi les stratégies existantes sur le véhicule cible.

- **Recherche d'un représentant par stratégie d'entrée**

Un représentant d'une stratégie de mouvement est défini comme étant le sujet qui caractérise au mieux les caractéristiques des sujets de la stratégie. Dans un premier temps un représentant « fictif » est déterminé. Ce dernier a comme caractéristiques la moyenne des angles articulaires des sujets de la classe du mouvement considérée. Par la suite un sujet « réel » représentant de la stratégie est déterminé. Ce sujet a les angles articulaires les plus proches de ceux du sujet fictif parmi les sujets de la stratégie considérée.

Les angles articulaires du sujet « fictif » sont calculés comme suit :

$$\bar{A}_k(j) = \frac{\sum_{i=1}^N A_i}{N}$$

Avec A_k les angles articulaires avec $k=1...20$, N le nombre de sujets par stratégie, et j le nombre de pas de temps considéré ($j=1...50$) (Cf. §3.3.8, Chapitre 3)

La distance entre chaque sujet et le sujet fictif est donnée par l'expression suivante :

$$D = \sqrt{\sum_{k=1}^{20} \sum_{j=1}^{50} (A_{kj} - \overline{A_{kj}})^2} \quad [2.30]$$

- **Evaluation du mouvement simulé**

Pour chaque mouvement simulé, les distances séparant les angles articulaires simulés avec ceux des sujets représentant des stratégies sont calculés. Ces distances servent pour évaluer les mouvements simulés par rapport aux stratégies existantes sur le véhicule cible. Les distances sont calculées en appliquant la formule [2.30].

2.6.4 Robustesse du simulateur développé

L'objectif est d'étudier la robustesse du simulateur développé. La procédure proposée étudie la variation des géométries des zones d'influence. La procédure évalue les limites du véhicule au-delà desquelles l'accessibilité pour le sujet retenu devient impossible. La procédure d'évaluation de la robustesse du simulateur est représentée dans la figure 2.15.

La procédure consiste à modifier la géométrie d'une (ou bien de plusieurs) zone (s) d'influence avec des pas de 2.5 cm. Les géométries de départ correspondent aux géométries du véhicule expérimental. Des repères sont, par la suite, attachés à chaque nouvelle zone d'influence définie et les nouveaux points caractéristiques sont calculés (Cf. §2.6.1.1). Les trajectoires reliant ces différents points sont déterminées. Puis, les angles articulaires sont calculés et utilisés pour générer les nouveaux mouvements. Les mouvements simulés sont évalués par rapport à leur réalisme (pas de sauts), c'est à dire :

- Si il ne présente pas de collision entre les différents segments corporels avec les différentes parties du nouveau véhicule.
- Si il est vérifié également si les angles articulaires calculés se situent à l'intérieur de l'intervalle des angles physiologiques définis par Kapandji (1974 ; 1975).

Plusieurs scénarii de modifications de la géométrie des zones d'influence sont envisageables, comme le fait de modifier une ou bien plusieurs zones à la fois.

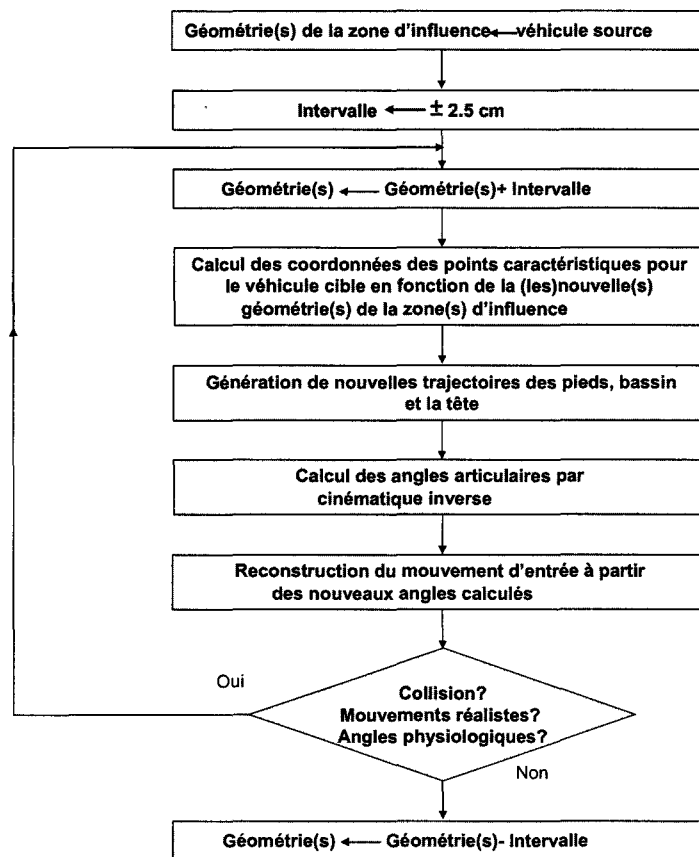


Figure 2 15. Algorithme de test de la robustesse du simulateur.

2.6.4 Conclusion

Dans cette partie nous avons présenté un outil de simulation cinématique du mouvement d'entrée d'un même sujet représenté par un humanoïde de synthèse (constitué ici d'une tête, d'un tronc, d'un bassin et des membres inférieurs) dans des habitacles de taille variable. Ce dernier nécessite un travail préparatoire (qui exploite et augmente les données de la base de mouvements exploitables) et de simulation, pour générer le mouvement d'entrée dans le véhicule désirée.

Le travail préparatoire vise à définir les zones d'influence (zones d'interaction), les instants caractéristiques (instants d'interaction) et les points caractéristiques (points anatomiques considérés lors des interactions). Cette étape s'achève par le calcul des coordonnées des points caractéristiques dans les repères liés aux zones d'influence retenues.

Le travail de simulation considère que les coordonnées des points caractéristiques calculées sont identiques dans le véhicule de simulation/désiré (Cf. §2.2.2). Les trajectoires simulées, reliant les points caractéristiques, sont bio-inspirées et utilisent les trajectoires des points caractéristiques mesurées sur le véhicule source. Le calcul des angles articulaires relève alors d'un problème de cinématique inverse, qui est résolu en formulant le problème comme

un problème d'optimisation sous contraintes. Des contraintes physiologiques, de « ressemblance » (avec le mouvement d'origine) et d'évitement d'obstacles sont proposées.

Une évaluation de la robustesse du simulateur est réalisée dans la dernière partie de ce paragraphe.

2.7 CONCLUSION

Ce chapitre a présenté la méthodologie mise en œuvre afin de simuler la cinématique du mouvement d'entrée d'un même sujet (constitué ici d'une tête, d'un tronc, d'un bassin et des membres inférieurs) dans des véhicules de dimensions variables. Dans une première partie les restrictions et les hypothèses de l'étude ont été précisées. Une méthodologie en 3 étapes pour simuler le mouvement d'entrée dans un véhicule automobile a été présentée. Celle-ci demande la construction d'une base de mouvements (Chapitre 3), l'analyse et l'identification des stratégies du mouvement d'entrée et le développement du simulateur permettant la simulation du mouvement d'entrée dans un véhicule automobile de taille variable.

La première partie de ce chapitre a précisé la structure de l'humanoïde de synthèse et son animation. Celui-ci est composé d'un corps de référence, le bassin, et de trois chaînes cinématiques simples ouvertes, qui lui sont connectées, représentant les 2 membres inférieurs et la chaîne réunissant le haut du tronc et la tête.

La deuxième partie a présenté une démarche automatique permettant d'identifier et de classer les stratégies d'entrée dans un véhicule automobile. Cette démarche tire son inspiration des travaux de Park et al. (Park et al., 2005) et de Lempereur (Lempereur, 2006). Celle-ci procède en plusieurs étapes. Une première classification est réalisée sur de nouveaux indices nommés les 3BJCV, de laquelle on tire les stratégies principales du mouvement. Puis, tout comme dans Lempereur (Lempereur, 2006), une Analyse Factorielle en Composante Multiple (AFCM) est appliquée sur les angles articulaires centrés réduits (Cf. Chapitre 3) afin d'en dégager les variables articulaires pertinentes. Enfin, une Classification Hiérarchique Ascendante (CHA) est appliquée aux mouvements des différents sujets en fonction des variables articulaires pertinentes identifiées, en vue d'identifier des stratégies et des sous stratégies d'entrée dans un véhicule automobile.

La troisième partie a présenté le simulateur permettant la simulation cinématique du mouvement d'entrée d'un même sujet (constitué ici d'une tête, d'un tronc, d'un bassin et des membres inférieurs) dans des habitacles de taille variable. Celui-ci nécessite un travail préliminaire, qui vise à définir les zones d'influence (zones d'interaction), les instants caractéristiques (instants d'interaction), les points caractéristiques (points anatomiques considérés lors des interactions) et le calcul des coordonnées des points caractéristiques dans les repères liés aux zones d'influence retenues.

La simulation considère les coordonnées des points caractéristiques dans le véhicule désiré identiques à celles calculées à partir des données expérimentales. Les trajectoires des points caractéristiques simulées sont bio inspirées et utilisent les trajectoires des points caractéristiques mesurées sur le véhicule source. Le calcul des angles articulaires relève d'un problème de cinématique inverse, qui est résolu en formulant le problème comme un problème d'optimisation sous contraintes. Cette partie se termine en proposant une méthode visant à vérifier la stratégie du mouvement simulé et un algorithme pour évaluer la robustesse du simulateur.

CHAPITRE 3
CONSTRUCTION DE LA BASE DE
MOUVEMENTS

CHAPITRE 3 : CONSTRUCTION DE LA BASE DE MOUVEMENTS

3.1 INTRODUCTION

Ce chapitre décrit les différentes étapes menant à la construction de la base de mouvements. La première partie de ce chapitre porte sur les moyens de mesures utilisés dans le cadre de nos travaux pour quantifier le mouvement d'entrée dans un véhicule automobile. Le dispositif et le protocole expérimental y sont largement détaillés. La deuxième partie est consacrée aux techniques et méthodes utilisées pour le traitement numérique des données expérimentales. Les données traitées constituent la base de mouvements « exploitables » sur laquelle les méthodes proposées au Chapitre 2 sont appliquées.

3.2 MESURE DU MOUVEMENT D'ENTREE DANS LE VEHICULE AUTOMOBILE

Les données expérimentales utilisées dans notre étude sont extraites des expérimentations menées dans le cadre du projet HANDIMAN (Pudlo et al., 2008 a), auxquelles nous avons contribué activement (Ait El Menceur et al., 2006 ; Ait El Menceur et al., 2007). Le projet HANDIMAN (RNTS 2004) est une réponse à l'appel à projets « Technologie pour le Handicap » lancé en 2004 par le Ministère Délégué à la Recherche et aux Nouvelles Technologies. Son consortium se compose du LAMIH (Laboratoire d'Automatique, de Mécanique et d'Informatique industrielles et Humaines, Université de Valenciennes et du Hainaut- Cambrésis), du SMPR (Service de Médecine Physique et de Réadaptation, CHRU de Lille), du LBMC (Laboratoire de Biomécanique et Mécanique des Chocs, INRETS Bron), du HANDIBIO-ESP (Université de Sud Toulon- Var) et du constructeur automobile Français RENAULT. Le projet HANDIMAN vise à intégrer la phase d'évaluation de l'inconfort du mouvement d'entrée-sortie dès les premières phases de la conception d'un véhicule automobile. Les populations âgées et/ou munies de prothèses de hanches et/ou de genoux sont prioritairement ciblées dans ce projet. Le HANDIMAN est un homme virtuel tridimensionnel « Handicapé » capable d'une part, d'entrer et de sortir dans un véhicule automobile et, d'autre part, de spécifier la gêne ressentie lors de la réalisation de son mouvement. La rétroaction doit permettre l'optimisation des dimensions du véhicule en accord avec la déficience motrice considérée.

Le projet HANDIMAN met en œuvre deux plateformes expérimentales localisées sur 2 sites : au LAMIH et au SMPR. Dans la présente étude, seule une partie des données recueillies sur le site du LAMIH par le projet HANDIMAN est exploitée. Les paragraphes suivants se focalisent exclusivement sur les moyens mis en œuvre pour acquérir les données nécessaires à notre étude.

3.2.1 Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental se compose principalement de 2 véhicules dénudés et d'un système optoélectronique de capture du mouvement tridimensionnel de type VICON® 612.

3.2.1.1 Véhicules dénudés

Deux véhicules sont retenus dans la présente étude : un petit monospace (PEUGEOT 806, dit le « grand véhicule ») et un petit véhicule (FORD Fiesta 1^{ère} génération, dit le « petit véhicule »). Ces deux véhicules sont choisis car ils proposent une géométrie remarquablement « différentes » (Cf. Fig. 3.2, tableau 3.1). Ces deux véhicules sont « dénudés » d'une part, pour favoriser la mesure du mouvement d'entrée et, d'autre part, pour faciliter leur déplacement au sein du laboratoire (Cf. Fig. 3.1). Les modifications opérées garantissent néanmoins la réalisation d'un mouvement d'entrée réaliste et donnent l'impression d'utiliser un véhicule réel.

Trois marqueurs fixés sur chaque véhicule définissent le repère local associé. La mesure de leur position permet de localiser le véhicule dans le repère lié au laboratoire. Enfin, chaque véhicule est muni de roulettes avec freins afin de faciliter leur positionnement repéré au sein de l'espace calibré.

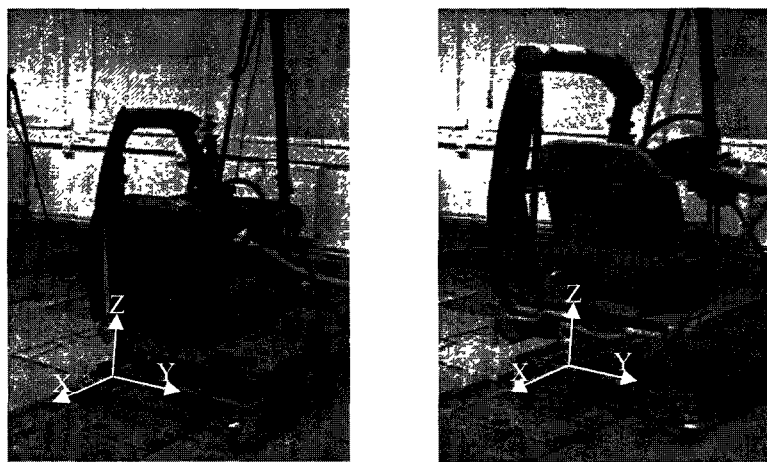


Figure 3 1. Les deux véhicules utilisés dans l'étude, à gauche le « petit véhicule », à droite le « grand véhicule ». Pour chaque véhicule les caractéristiques principales (ex. la position du siège, le volant, le bavolet*) sont maintenues.

Les principales caractéristiques géométriques des 2 véhicules sont résumées dans le tableau 3.1. La figure 3.2 explicite ces dimensions.

	N° dans la Figure 3.2	Petit Véhicule	Grand Véhicule
Largeur de la portière	1	760	790
Hauteur de la portière à partir du bavolet	2	820	1110
Hauteur du bavolet à partir du sol	3	360	440
Hauteur du bavolet à partir du plancher	4	125	0
Hauteur du siège à partir du sol	5	530	790

Tableau 3 1. Principales caractéristiques géométriques (mm) des 2 véhicules retenus.

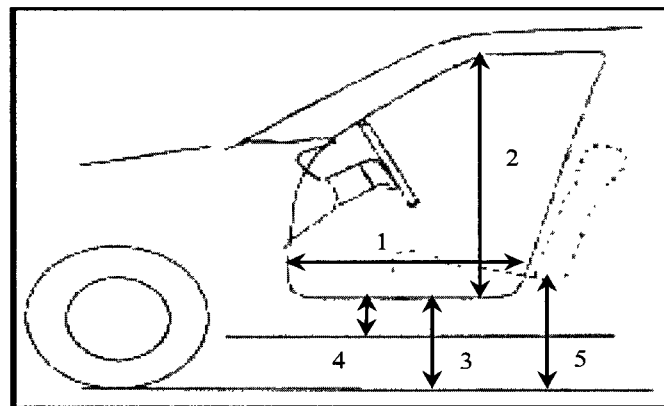


Figure 3 2. Illustration des caractéristiques géométriques introduites au tableau 3.1.

3.2.1.2 Système optoélectronique de capture du mouvement

La capture du mouvement d'entrée est réalisée à l'aide du système optoélectronique de capture du mouvement tridimensionnel Vicon® 612 (Oxford Metrics, Royaume-Uni) muni de 8 caméras CCD haute résolution (1 million de pixels). La fréquence d'échantillonnage est de 60Hz. La précision en statique est de 0.21% sur les distances et 0.18% sur les angles ; elle est en dynamique de 0.24% sur les distances et de 1.62% sur les angles (Gillet, 2004). Ces précisions sont très satisfaisantes pour les études biomécaniques selon Richards et al. (Richards et al., 1999).

Ce système utilise des capteurs passifs nommés marqueurs. Les marqueurs sont des petites sphères de 20 mm de diamètre (dans le cadre de notre étude) recouvertes d'un film, le scotch-lite. Le scotch-lite possède la propriété de réfléchir la lumière infra rouge dans une direction identique à celle des rayons incidents (Barbier, 1994).

Calibration du système optoélectronique Vicon®

La calibration consiste à définir un repère à l'espace de travail. Elle procède en 2 phases. Une première phase dite « calibration statique » vise à définir les axes et l'origine du

repère orthonormé « dit repère absolu » ou encore « repère laboratoire ». Elle demande l'utilisation d'une équerre dite « équerre de calibration » (Cf. Fig. 3.3 a), qui doit être vue par au moins 2 caméras. Celle-ci, munie de 4 marqueurs dont les positions sont prédéfinies dans le système, définit le repère laboratoire. Une deuxième phase dite « calibration dynamique » vise à affiner la position des caméras et de définir le volume d'acquisition (Gillet, 2004). Elle demande l'utilisation d'une tige dite « tige de calibration » (Cf. Fig. 3.3.b). Cette tige de calibration est munie de 2 gros marqueurs séparés d'une distance de 500 mm prédéfinie dans le système. Pour plus d'informations le lecteur est invité à consulter le manuel du système Vicon®.

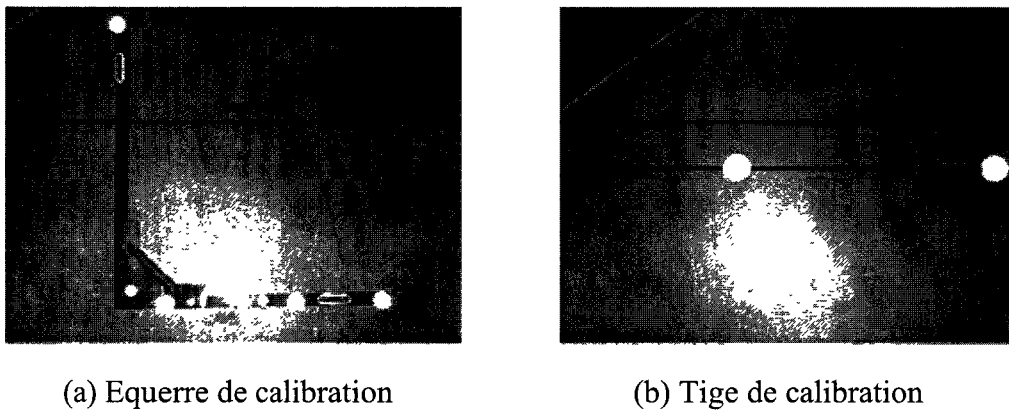


Figure 3 3. *Outils de calibration du système Vicon®.*

Disposition des caméras autour du véhicule

Le système optoélectronique Vicon® fonctionne selon le principe de la stéréovision passive. C'est le même principe mis en œuvre par la vision humaine, pour distinguer la profondeur des scènes naturelles. Ce principe impose à chaque marqueur d'être vu par au moins deux caméras à chaque instant. Dans notre étude, la position des caméras autour du véhicule a demandé de nombreux essais et erreurs afin de respecter au mieux cette condition (Cf. Fig. 3.4). Néanmoins, malgré cet effort important, des pertes de marqueurs (soit par occultation ou bien des pertes physiques causées par la morphologie de certains sujets) ont eu lieu.

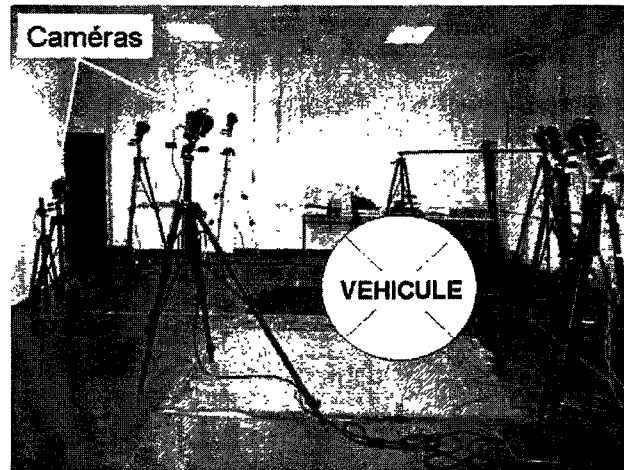


Figure 3 4. *Disposition des caméras autour du véhicule.*

Le système optoélectronique est relié à une station de calcul, qui à son tour est connectée à un ordinateur de type PC. Le système optoélectronique et ses accessoires sont contrôlés à l'aide d'un logiciel dédié, le Vicon WorkStation. De plus, ce système dispose de ports de communication permettant sa liaison avec d'autres périphériques, telles que des plateformes de force, des EMG....

3.2.2 Population

Quarante et un sujets ont pris part aux expérimentations (27 sujets masculins et 14 sujets féminins) (Cf. Fig. 3.5). Ces sujets conducteurs sont principalement des sujets de plus de 65 ans (dits sujets âgés) et/ou des sujets munis de prothèses de hanche et/ou de genou (côté droit et/ou gauche). Parmi les 41 sujets, 7 sujets sains, issus de l'Université de Valenciennes, constitue la population témoin. A cette dernière, s'ajoute un sujet extérieur sain de moins de 65 ans (64 ans). Parmi les 25 sujets âgés, 7 sujets ont des prothèses de hanches et/ou de genoux (côté droit ou gauche). Les 8 autres sujets ayant des prothèses ont moins de 65 ans. Les principales caractéristiques des sujets expérimentés sont synthétisées dans les tableaux 3.2 et 3.3.

Au final néanmoins, seuls les sujets présentant un mouvement d'entrée de (très) bonne qualité (avec une perte de marqueurs très limitée) sont retenus, soit 33 sujets pour le « petit véhicule » et 37 sujets pour le « grand véhicule ». L'annexe A.3.1 présente les caractéristiques des sujets retenus sur les deux véhicules considérés dans la présente étude.

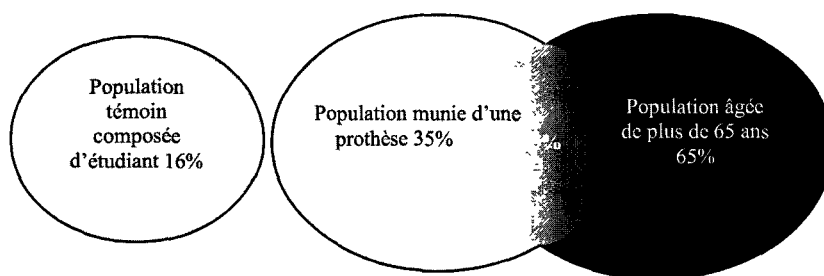


Figure 3 5. Répartition de la population expérimentée.

Sujet.	Nombre	Ages (années)	Tailles (mm)	Poids (kg)	Sexe	
					M	F
Jeune Sain	8	26±5	1758±134	70±11	6	2
Agé Sain	18	71±5	1658±89	73±15	11	7
Muni de prothèse	15	62±13	1743±82	85±18	10	5
Total	41	59±18	1707±103	77±17	27	14

Tableau 3 2. Synthèse des sujets ayant pris part aux expérimentations.

Sujet.	Nombre	Ages (Années)	Tailles (mm)	Poids (kg)	Sexe	
					M	F
Prothèse Hanche Droite	5	58±15	1742 ±72	73± 16	3	2
Prothèse Genou Droit	1	84	1720	102	1	-
Prothèse Hanche Gauche	2	58±1	1865 ±5	98±6	2	-
Prothèse Genou Gauche	4	68	1740	56	3	1
Prothèse des 2 hanches	2	51±10	1705 ±5	102±26	1	1
Prothèse des 2 hanches + Prothèse Genou Droit	1	68	1630	65	-	1
Total	15	62±13	1743 ±82	85±18	10	5

Tableau 3 3. Synthèse des sujets munis d'une prothèse ayant pris part aux expérimentations.

3.2.3 Protocole expérimental

Le protocole expérimental procède en plusieurs étapes. La durée moyenne d'une expérimentation par sujet est de 2 heures. La figure 3.6 synthétise ces différentes étapes.

❶ Accueil du sujet

L'accueil du sujet consiste en une présentation des expérimentateurs et une description du protocole et du dispositif expérimental ainsi que les objectifs.

② *Préparation du sujet*

Le sujet est invité à retirer ses vêtements et à revêtir un cuissard de cycliste (et une brassière si celui-ci est de sexe féminin) dans une partie de la salle d'expérimentation aménagée en vestiaire. Le sujet conserve ses chaussures pour les expérimentations.

③ *Mesure anthropométrique*

Il est mesuré principalement pour chaque sujet des longueurs (ex. cuisse, bras), des largeurs (ex. épaule, hanche), des circonférences (ex. cuisse, jambe). L'annexe A.3.2 revient plus amplement sur ces mesures. Dans la présente étude, seules les longueurs sont exploitées.

④ *Pose des marqueurs*

Dans le cadre du projet HANDIMAN, 53 marqueurs, dont trente-neuf anatomiques et quatorze techniques, sont apposés sur la peau de chaque sujet, comme le montre la figure 3.7. Les marqueurs techniques (dits parfois rotateurs) sont placés sur les bras, avant-bras, cuisses et jambes. Les marqueurs anatomiques sont utilisés pour caractériser les mouvements articulaires. Chaque marqueur technique est combiné à deux marqueurs anatomiques positionnés sur le même segment corporel afin de quantifier son orientation spatiale dans le repère laboratoire. Le positionnement des marqueurs suit les recommandations de l'ISB (International Society of Biomechanics (Wu et al., 2002)). Il minimise par ailleurs les mouvements des masses molles et réduit les glissements de peau (Leardini et al., 2005). Ce positionnement permet de définir des repères anatomiques sur chaque segment corporel et permet ainsi de calculer les angles articulaires caractérisant la mobilité articulaire de chaque segment corporel (Cf. §3.4.5 et §3.4.6). La figure 3.7 et le tableau 3.4 décrivent respectivement le positionnement et le label des différents marqueurs apposés sur la peau du sujet.

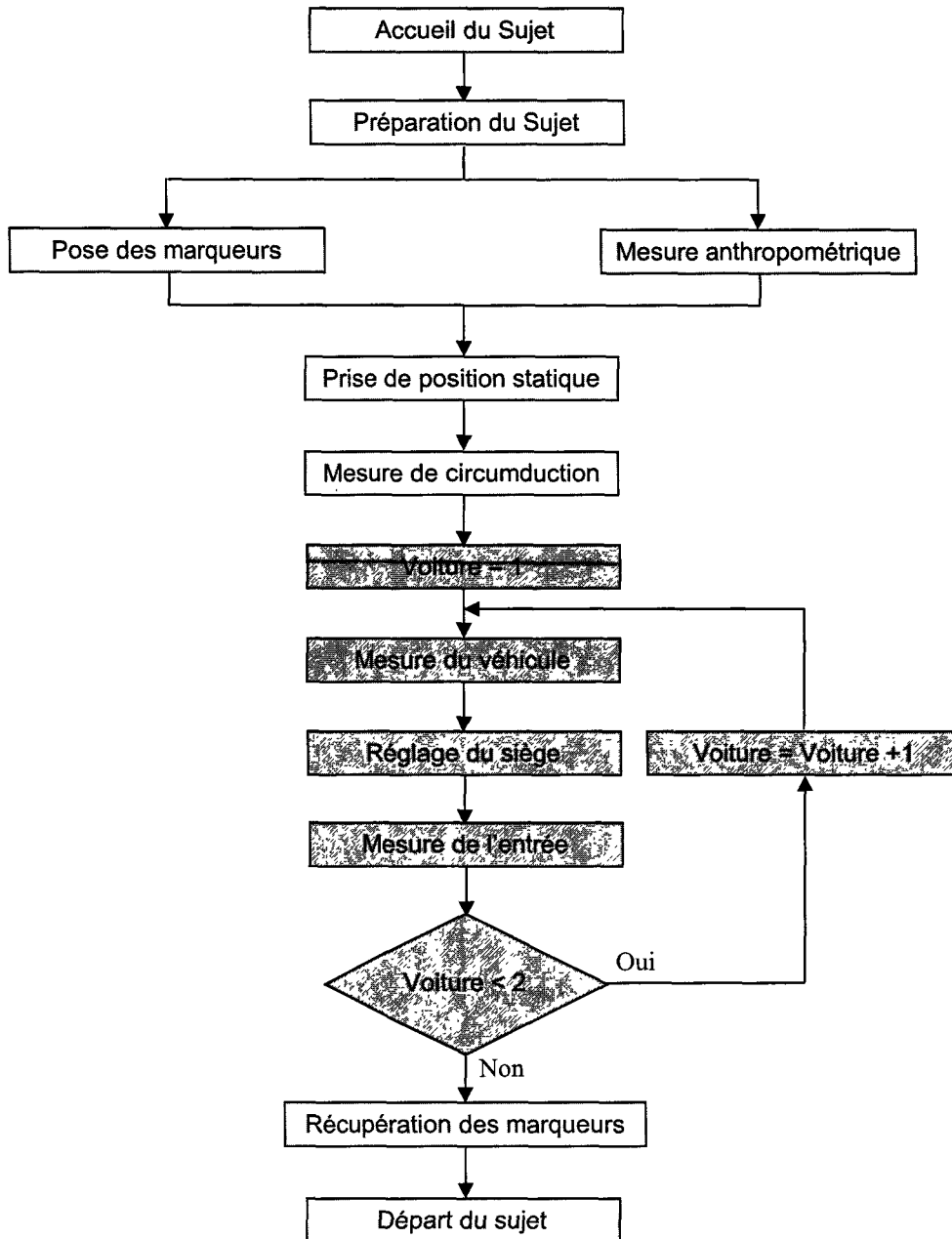


Figure 3 6. Déroulement d'une expérimentation au LAMIH.

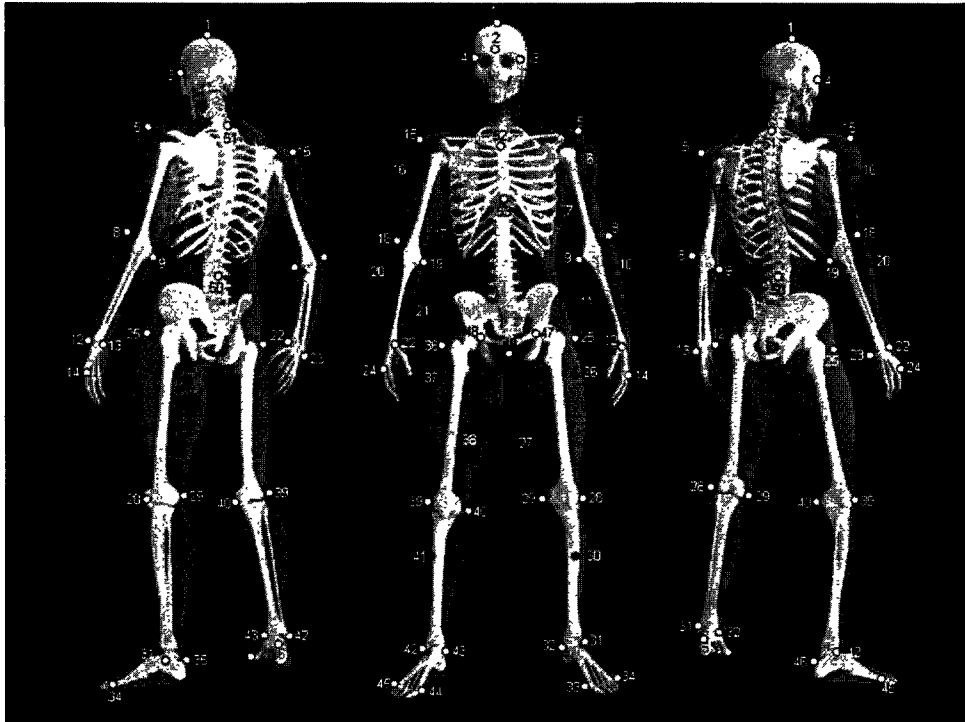


Figure 3 7. Position des marqueurs sur le sujet (outil graphique : Bernhard Ungerer).

Tête		Membre supérieur gauche		Membre supérieur droit		Membre inférieur gauche		Membre inférieur droit		Bassin Colonne vertébrale Torse	
N°	Libellé	N°	Libellé	N°	Libellé	N°	Libellé	N°	Libellé	N°	Libellé
1	vertex	5	Acromion gauche	15	Acromion droit	25	Grand trochanter gauche	36	Grand trochanter droit	47	Epine iliaque antérieure gauche
2	front	6	Rotateur bras gauche 1	16	Rotateur bras droit 1	26	Rotateur cuisse gauche 1	37	Rotateur cuisse droite 1	48	Epine iliaque antérieure droite
3	Temple gauche	7	Rotateur bras gauche 2	17	Rotateur bras droit 2	27	Rotateur cuisse gauche 2	38	Rotateur cuisse droite 2	49	Pubis
4	Temple droit	8	Coude externe gauche	18	Coude externe droit	28	Genou externe	39	Genou externe	50	L5
		9	Coude interne gauche	19	Coude interne droit	29	Genou interne	40	Genou interne	51	C7
		10	Rotateur avant bras gauche 1	20	Rotateur avant bras droit 1	30	Rotateur jambe gauche	41	Rotateur jambe droite	52	Manubrium
		11	Rotateur avant bras gauche 2	21	Rotateur avant bras droit 2	31	Chevilles externe.	42	Chevilles externe.	53	Xiphoïde
12	Poignet externe	22	Poignet externe	32	Chevilles interne	43	Chevilles interne				

	gauche		droit				
13	Poignet interne gauche	23	Poignet interne droit	33	Tarse 1 gauche	44	Tarse 1 droit
14	Métatarse gauche	24	Métatarse droit	34	Tarse 5 gauche	45	Tarse 5 droit
				35	Talon gauche	46	Talon droit

Tableau 3 4. Label et position anatomique des 53 marqueurs.

Remarque. Les marqueurs liés aux membres supérieurs ne sont pas exploités dans la présente thèse.

⑤ *Prise de position statique*

Durant cette étape, il est demandé aux sujets de maintenir une position dite « statique », assis sur un tabouret (Cf. Fig. 3.8). Le sujet dans cette position muni des marqueurs est capturé avec le système optoélectronique de capture de mouvement Vicon®. Cette mesure est exploitée pour reconstruire la position du marqueur L5 (Cf. §3.4.1) occulté par le dossier du siège de la voiture lors des mouvements d'entrée dans un véhicule automobile.



Figure 3 8. Capture en position « statique » assis à l'intérieur de la grille de calibration.

⑥ *Mesure de circumduction*

Cette étape vise à estimer les positions des centres articulaires des hanches (Cf. §3.4.2). Chaque sujet effectue des mouvements de circumduction des jambes (droite et gauche). Il est demandé au sujet de maintenir la jambe bien tendue lors de ces mouvements (Cf. Fig. 3.9).

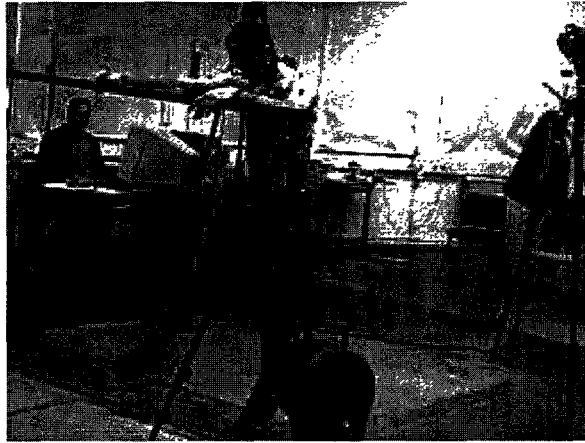


Figure 3 9. *Réalisation des mouvements de circumduction de la jambe.*

⑦ *Mouvements d'entrée dans le véhicule*

Les phases décrites ci-dessous sont répétées pour chacun des 2 véhicules.

• Localisation du véhicule

La capture des 3 marqueurs fixés au véhicule dans l'espace calibré est réalisée avec le système optoélectronique Vicon®. Elle permet de préciser la position spatiale du véhicule dans le repère lié au laboratoire. Elle est utilisée par la suite pour dessiner la carcasse de chaque véhicule en vis-à-vis des mouvements mesurés et/ou simulés (Cf. §3.2.4).

• Réglage du siège

Il est demandé au sujet de se mettre en position de conduite. Le sujet a la possibilité de déplacer son siège sur l'avant ou sur l'arrière (uniquement).

• Mesure du mouvement d'entrée

La mesure du mouvement d'entrée suit la procédure suivante :

- le sujet démarre son mouvement d'une position repérée par 2 lignes tracées sur le sol,
- le sujet réalise un pas en direction du véhicule,
- le sujet adopte une posture, type anatomique (bras écartés), dans laquelle tous les marqueurs sont vus (Cf. Fig. 3.10),
- le sujet ouvre la porte et entre dans le véhicule le plus naturellement possible, puis referme la porte,
- le sujet, une fois à l'intérieur, pose les mains sur le volant.

Cette mesure du mouvement est réalisée quatre fois de suite sur chaque véhicule expérimenté. A l'issus de ces quatre manipulations seule une manipulation d'entrée par sujet est retenue (celle qui présente moins de perte de marqueurs).



Figure 3 10. *Posture adoptée avant d'entrée dans le véhicule.*

3.2.4 Dessin de la carcarasse des véhicules automobiles

Dans des manipulations réalisées au préalable, 36 marqueurs, dont les 3 maintenus positionnés lors des expérimentations, ont été fixés sur chaque véhicule et sont capturés à l'aide du système Vicon® (Cf. Fig. 3.11). La figure 3.11 montre le positionnement de ces marqueurs sur chaque véhicule. Le tableau 3.5 explicite ces marqueurs.

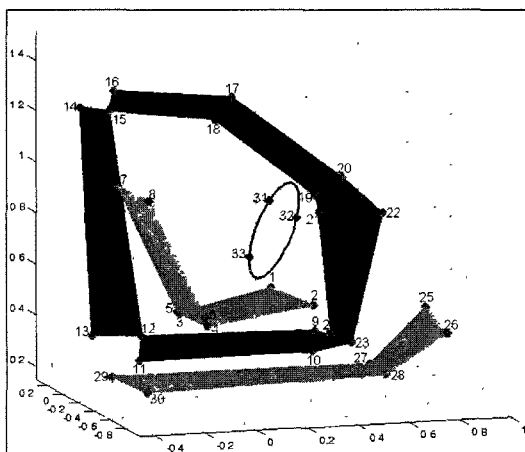


Figure 3 11. *Position des marqueurs sur chaque véhicule.*

N°	Libellé	N°	Libellé	N°	Libellé
1	assise_1	12	bavolet_4	23	limite_portière_3
2	assise_2	13	Pied_Milieu_1	24	limite_portière_4
3	assise_3	14	Pied_Milieu_2	25	pedal_1
4	assise_4	15	Pied_Milieu_3	26	pedal_2
5	dossier_1	16	brancard_1	27	pedal_3
6	dossier_2	17	brancard_2	28	pedal_4
7	dossier_3	18	brancard_3	29	Planchet_1
8	dossier_4	19	cote_lateral_portière_1	30	Planchet_2
9	bavolet_1	20	cote_lateral_portière_2	31	volant_1
10	bavolet_2	21	Limite_portière_1	32	volant_2

11	bavolet_3	22	Limite_portière_2	33	volant_3
----	-----------	----	-------------------	----	----------

Tableau 3 5. Label des 33 marqueurs apposés sur chaque véhicule.

Les trois marqueurs apposés sur le volant (Cf. Fig. 3.11) définissent un repère pour le volant. Ce repère divise le plan du volant en 4 quadrants. Trois cent soixante points sont générés dans le repère lié au volant pour former un cercle représentant le volant en utilisant la formule suivante :

$$\left\{ \begin{array}{l} P_v = (R_v * \cos(\theta_i), R_v * \sin(\theta_i)) \quad \text{si } 0 < \theta_i < \frac{\pi}{2} \\ P_v = \left(-R_v * \sin\left(\theta_i - \frac{\pi}{2}\right), R_v * \cos\left(\theta_i - \frac{\pi}{2}\right) \right) \quad \text{si } \frac{\pi}{2} < \theta_i < \pi \\ P_v = (-R_v * \cos(\theta_i - \pi), -R_v * \sin(\theta_i - \pi)) \quad \text{si } \pi < \theta_i < \frac{3\pi}{2} \\ P_v = \left(R_v * \sin\left(\theta_i - \frac{3\pi}{2}\right), -R_v * \cos\left(\theta_i - \frac{3\pi}{2}\right) \right) \quad \text{si } \frac{3\pi}{2} < \theta_i < 2\pi \end{array} \right. \quad \text{Pour } \theta_i = 0 \text{ à } 2\pi \text{ [3.1]}$$

Avec :

P_v : Coordonnée d'un point appartenant au volant dont la position est exprimée dans le repère lié au volant (projetée sur le plan à deux dimensions contenant le volant).

R_v : Le rayon du volant

Les coordonnées des 360 points créés dans le repère lié au volant sont alors exprimées dans le repère lié au véhicule par changement de base.

3.2.5. Conclusion

Cette première partie a présenté le dispositif et le protocole expérimental mis en place pour recueillir les données nécessaires à notre étude. Deux véhicules sont retenus dans la présente étude : un « grand véhicule » de type monospace (PEUGEOT 806) et un « petit véhicule » (FORD Fiesta 1^{ère} génération). La capture des mouvements d'entrée est réalisée à l'aide d'un système optoélectronique de capture de mouvement tridimensionnel de type Vicon® 612. Les mouvements de 33 sujets sur le « petit véhicule » et ceux de 37 sujets sur le « grand véhicule » constituent nos données brutes en sortie d'expérimentations. Elles correspondent aux coordonnées 3D des 53 marqueurs placés sur les sujets. Enfin, des marqueurs ont été disposés sur chaque véhicule lors d'une expérimentation spécialement dédiée au dessin de leur carcasse dans l'environnement informatique.

3.3 TRAITEMENTS DE DONNEES

Cette partie précise les traitements numériques appliqués aux coordonnées 3D des marqueurs issues des captures réalisées. Ces traitements ont pour objectif d'obtenir les données nécessaires à l'application des méthodes proposées au Chapitre 2.

3.3.1 Estimation de la position du marqueur apposé au niveau de L5

L'estimation du centre articulaire de la hanche (Cf. §3.3.2) et la définition du repère anatomique lié au bassin (Cf. §3.3.5) nécessitent la connaissance de la position spatiale du marqueur apposé à la hauteur de la 5^{ème} vertèbre lombaire (dite L5) à chaque instant. Malheureusement ce dernier est masqué par le siège lorsque le sujet entre dans le véhicule automobile. La reconstruction des positions occultées est réalisée en 2 phases :

Calcul de la position du marqueur L5 dans le repère lié au bassin

L'expérimentation dite position « statique », durant laquelle le sujet est assis, est utilisée pour définir le repère lié au bassin (Cf. Fig. 3.8). La moyenne des coordonnées des marqueurs apposés autour du bassin (Cf. Fig. 3.12) sur la durée totale de cette expérimentation est considérée. Le marqueur « pubis » est choisi comme origine de ce repère. Deux premiers axes sont formés en utilisant les deux marqueurs apposés sur les deux épines iliaques antérieures (Cf. §3.2.3). Le repère orthonormé B lié au bassin est alors construit $(Pubis, \vec{u}, \vec{v}, \vec{w})$ (Cf. Fig. 3.12).

La position du marqueur L5 dans le repère lié au bassin est donnée par l'expression suivante :

$${}^B L5 = ({}^L T_B)^{-1} \times {}^L L5 \quad [3.2]$$

Avec ${}^B L5$ la position tridimensionnelle du marqueur L5 dans le repère lié au bassin (donnée recherchée), ${}^L T_B$ la matrice de transformation homogène définissant l'orientation spatiale du repère lié au bassin dans le repère laboratoire et ${}^L L5$ la position du marqueur L5 exprimé dans le repère laboratoire.

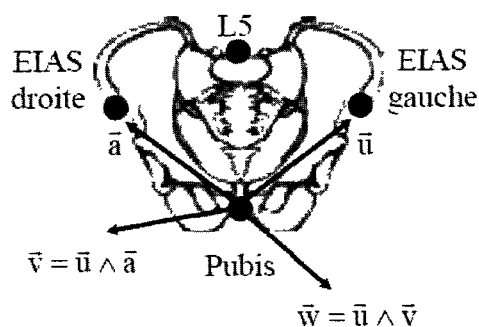


Figure 3 12. Repère $(Pubis, \vec{u}, \vec{v}, \vec{w})$ lié au pubis (Lempereur, 2006).

Estimation de la position du marqueur L5 après occultation

L'estimation de la position du marqueur L5 après occultation repose sur l'hypothèse que la position du marqueur L5 est fixe dans le repère lié au bassin supposé indéformable. La position du marqueur L5, à chaque instant, est alors donnée par l'expression suivante :

$${}^L L5(t) = {}^L T_B(t) \times {}^B L5 \quad [3.3]$$

Avec ${}^L L5(t)$ la position tridimensionnelle du marqueur L5 dans le repère lié au laboratoire (donnée recherchée), ${}^L T_B(t)$ la matrice de transformation homogène définissant l'orientation spatiale du repère lié au bassin dans le repère laboratoire, à chaque instant, et ${}^B L5$ la position du marqueur L5 exprimée dans le repère lié au bassin (donnée connue depuis la première phase).

3.3.2 Estimation des centres articulaires

La connaissance des centres articulaires est nécessaire afin de définir les repères anatomiques liés à chaque segment corporel, à l'origine du calcul des angles articulaires (Cf. § 3.4.5).

Estimation de la position du centre articulaire de la hanche

L'estimation de la position du centre articulaire de la hanche est réalisée à partir des expérimentations dites de « circumduction » (Cf. §3.2.3). Cette estimation utilise la méthode fonctionnelle dite de « sphere fitting » (Cf. Annexe A.3.3) (Leardini et al., 1999 ; Piazza et al., 2001). Le principe de cette méthode est de supposer que les marqueurs apposés sur le genou décrivent des sphères au cours du mouvement de circumduction de la cuisse. Ces sphères ont un centre commun de rotation qui correspond au centre articulaire de la hanche.

Estimation des positions des centres articulaires des genoux et des chevilles

Les centres articulaires des genoux et des chevilles sont supposés être les points milieux entre les marqueurs apposés de part et d'autre sur chaque articulation comme le recommandent Cappozo et al. (Cappozo et al., 1995).

3.3.3 Filtrage des données

Les données mémorisées (les coordonnées 3D des marqueurs et des centres articulaires) sont filtrées afin d'atténuer les différents bruits inhérents à l'utilisation du système de mesure et aux conditions expérimentales. Ces données sont filtrées via un filtre de Butterworth d'ordre 4 sans déphasage (Winter, 1990 ; Allard et al., 1990). La fréquence de coupure utilisée est déterminée de façon à conserver plus de 98% de la puissance spectrale des signaux traités (Lempereur, 2006).

3.3.4 Expression des données dans le repère lié au véhicule automobile

L'objectif est d'exprimer les coordonnées 3D, initialement exprimées dans le repère lié au laboratoire, dans le repère lié au véhicule expérimenté (Cf. Fig. 3.1). Les positions spatiales exprimées dans le repère véhicule sont données par l'équation suivante.

$${}^{veh}P(t) = ({}^L T_{veh})^{-1} \times {}^L P(t) \quad [3.4]$$

Avec ${}^{veh}P(t)$, la position spatiale des données mémorisées dans le repère lié au véhicule considéré à chaque pas de temps, ${}^L T_{veh}$, la matrice de transformation homogène permettant le passage du repère lié au véhicule considéré au repère de laboratoire et ${}^L P(t)$, la position d'une donnée exprimée dans le repère lié au laboratoire à chaque pas de temps.

3.3.5 Calcul des angles articulaires en considérant le bassin comme racine

Les angles articulaires sont calculés en suivant les recommandations de l'International Society of Biomechanics (ISB). Tout d'abord, un repère local est associé à chaque segment corporel selon Wu et al. (Wu et al., 2002) (Cf. Fig. 3.13). Puis, les angles articulaires, définissant l'orientation spatiale d'un segment corporel par rapport au repère lié à son segment corporel immédiatement proximal (Cf. Fig. 3.13), sont calculés. La convention de Grood et Suntay (Grood et Suntay, 1983) est adoptée dans le processus de calcul. Cette convention considère trois rotations successives autour de trois axes. Le premier axe appartient à un segment, le dernier axe appartient à son segment distal. Le deuxième axe, suivant lequel a lieu la deuxième rotation, résulte du produit vectoriel des deux autres. Cet axe est appelé axe « flottant » car il n'est fixé à aucun des deux segments articulés. Le repère formé par ces trois axes est appelé « repère lié à l'articulation » et doit être distingué des repères liés aux segments, qui définissent habituellement les axes de rotation pour le calcul des angles d'Euler. Il est à noter que le premier et le troisième axe ne sont perpendiculaires que pour des valeurs particulières de l'angle flottant, défini comme l'angle de rotation autour de l'axe du même nom. L'orientation spatiale de la racine (le bassin) est calculée par rapport au repère lié au véhicule automobile. Les différents repères anatomiques attachés à chaque segment corporel sont résumés dans la figure 3.13. Les repères associés aux segments corporels sont présentés dans les tableaux 3.6 à 3.11.

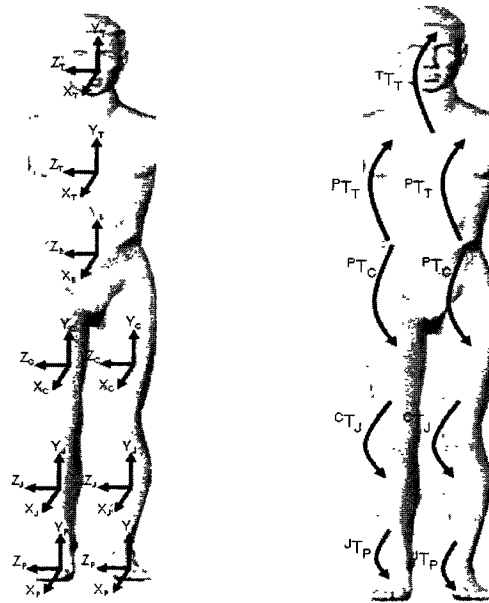


Figure 3 13. Définition des différents repères associés aux segments corporels (calcul des angles articulaires en prenant le bassin comme base)

Les repères liés au membre inférieur gauche sont définis, tout comme le membre inférieur droit, de manière que l’axe z de chaque repère soit orienté vers la droite et l’axe y dans le prolongement du segment.

Axe	Description
Z_B	Point d’extrémité : Hanche Gauche
	Point d’extrémité : Hanche Droite
A_B	Point d’extrémité : Pubis
	Point d’extrémité : L5
Y_B	$Y_B = A_B \wedge Z_B$
X_B	$X_B = Y_B \wedge Z_B$

Tableau 3 6. Définition du repère lié au bassin (la base).

Axe	Description
Z_T	Point d’extrémité : Epaule Gauche
	Point d’extrémité : Epaule Droite
A_T	Point d’extrémité : Xiphoïde
	Point d’extrémité : Manubrium
X_T	$X_T = A_T \wedge Z_T$
Y_T	$Y_T = Z_T \wedge X_B$

Tableau 3 7. Définition du repère lié au tronc.

Axe	Description
Z _T	Point d'extrémité : Tempe Gauche
	Point d'extrémité : Tempe Droit
A _T	Point d'extrémité : Milieu des tempes
	Point d'extrémité : Vertex
X _T	$X_T = A_T \wedge Z_T$
Y _T	$Y_T = Z_T \wedge X_B$

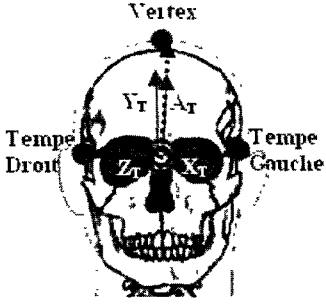


Tableau 3 8. Définition du repère lié à la tête.

Axe	Description
Y _C	Point d'extrémité : Centre Genou
	Point d'extrémité : Centre Hanche
A _C	Point d'extrémité : Genou Interne
	Point d'extrémité : Genou Externe
X _C	$X_C = Y_C \wedge A_C$
Z _C	$Z_C = X_C \wedge Y_C$

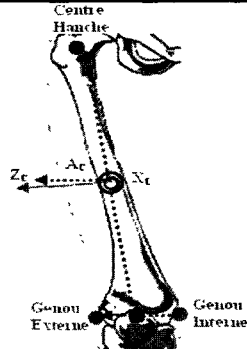


Tableau 3 9. Définition du repère lié à la cuisse droite.

Axe	Description
Y _J	Point d'extrémité : Centre Cheville
	Point d'extrémité : Centre Genou
A _J	Point d'extrémité : Cheville Interne
	Point d'extrémité : Cheville Externe
X _J	$X_J = Y_J \wedge A_J$
Z _J	$Z_J = X_J \wedge Y_J$

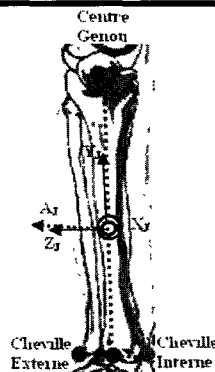


Tableau 3 10. Définition du repère lié à la jambe droite.

Axe	Description
Y _P	Point d'extrémité : Milieu Métatarses
	Point d'extrémité : Centre Cheville
A _P	Point d'extrémité : Cheville Interne
	Point d'extrémité : Cheville Externe
X _P	$X_p = Y_p \wedge A_p$
Z _P	$Z_p = X_p \wedge Y_p$

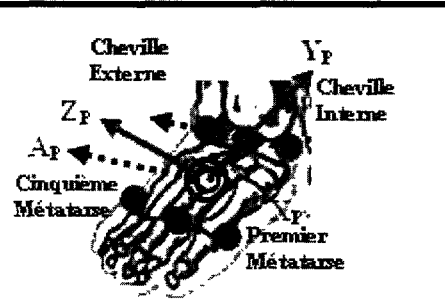


Tableau 3 11. Définition du repère lié au pied droit.

Le calcul des angles articulaires s’effectue en trois étapes comme dans (Lempereur, 2006) :

Etape 1 : Cette étape consiste à calculer les matrices de transformation homogènes exprimant la position et l’orientation spatiale de chaque segment corporel dans le repère lié au laboratoire à chaque pas de temps. Les matrices homogènes ainsi calculées sont de la forme ${}^L T_{seg}(t)$.

Etape 2 : Cette étape consiste à calculer les matrices de transformations homogènes exprimant le passage entre deux segments corporels successivement proximaux. Par exemple, la matrice de passage entre la cuisse et la jambe est donnée par l’expression suivante :

$${}^{Cuisse} T_{Jambe}(t) = ({}^L T_{Cuisse}(t))^{-1} \times {}^L T_{Jambe}(t) \tag{3.5}$$

Avec ${}^L T_{Cuisse}(t)$ la matrice homogène exprimant la position et l’orientation spatiale de la cuisse dans le repère lié au laboratoire à chaque pas de temps et ${}^L T_{Jambe}(t)$ la matrice homogène donnant la position et l’orientation spatiale de la jambe dans le repère lié au laboratoire à chaque pas de temps. De la même façon les matrices de transformation homogènes définissant les positions et orientations spatiales des autres segments corporels sont calculées : ${}^{Bas\ sin} T_{Tronc}(t)$, ${}^{Tronc} T_{Tete}(t)$, ${}^{Bas\ sin} T_{Cuisse}(t)$, ${}^{Jambe} T_{Pied}(t)$.

Etape 3 : Cette étape consiste à extraire les angles articulaires définissant l’orientation spatiale de chaque segment corporel par rapport au segment immédiatement proximal. Le calcul s’effectue en suivant la séquence d’Euler ZXY selon les recommandations de l’ISB (Wu et al., 2002). La multiplication des angles articulaires définis par cette séquence forme une matrice R de la forme suivante :

$$R = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} \end{bmatrix} \tag{3.6}$$

L'expression détaillée de la matrice R est donnée par (Sciavico et Siciliano, 2001) et repris ci-dessous :

$$R = \begin{bmatrix} C\alpha C\gamma - S\alpha S\beta S\gamma & -S\alpha C\beta & C\alpha S\gamma + S\alpha S\beta C\gamma \\ S\alpha C\gamma + C\alpha S\beta S\gamma & C\alpha C\beta & S\alpha S\gamma - C\alpha S\beta C\gamma \\ -C\beta S\gamma & S\beta & C\beta C\gamma \end{bmatrix} \quad [3.7]$$

Avec :

α : l'angle de rotation autour de l'axe z et donné par l'expression suivante :

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{-R_{12}}{R_{22}}\right)$$

β : l'angle de rotation autour de l'axe x et donné par l'expression suivante :

$$\beta = \sin^{-1}(R_{32})$$

γ : l'angle de rotation autour de l'axe y et donné par l'expression suivante :

$$\gamma = \tan^{-1}\left(\frac{-R_{31}}{R_{33}}\right)$$

Où C et S indiquent respectivement la fonction « cosinus » et « sinus ».

Vingt quatre angles articulaires sont calculés par la procédure décrite ci-dessus. Vingt valeurs sont retenues (correspondant aux 20 degrés de liberté de notre modèle (Cf. Chapitre 2), auxquelles s'ajoutent 3 valeurs d'orientation spatiale de la base (le bassin) par rapport au repère lié au véhicule. Nous tenons à préciser que les angles (abduction/ adduction des genoux et rotation interne/ externe des chevilles), non retenus dans la modélisation, ont des valeurs non nulles. Ils sont sources d'erreurs dans l'animation du mouvement.

3.3.6 Calcul des angles articulaires en considérant le bassin comme effecteur

Les angles articulaires sont cette fois calculés dans l'ordre dit « inversé ». Les angles articulaires, définissant l'orientation spatiale du repère lié à un segment corporel, sont calculés cette fois par rapport au repère lié à son segment corporel immédiatement *distal* (Cf. figure 3.14). Les pieds et la tête (les effecteurs habituels) sont considérés dans ce cas comme des bases. Le bassin est assimilé à l'effecteur. Les repères locaux associés à chaque segment corporel sont identiques à ceux présentés en figure 3.13. Trois repères supplémentaires sont définis (Cf. Fig. 3.14). Ces derniers sont liés, respectivement, à la tête et aux deux pieds. Les angles articulaires sont calculés toujours en suivant les recommandations de l'International Society of Biomechanics (ISB) (Wu et al., 2002). La convention de Grood et Suntay (Grood et Suntay, 1983) (Cf. §3.3.5) est adoptée également dans le processus de calcul. Le calcul des angles articulaires s'effectue toujours en trois étapes (Cf. §3.3.5) suivant les recommandations de l'ISB (Wu et al., 2002) et selon la même séquence d'Euler (ZXY). Seul diffère l'ordre des calculs : du distal vers le proximal.

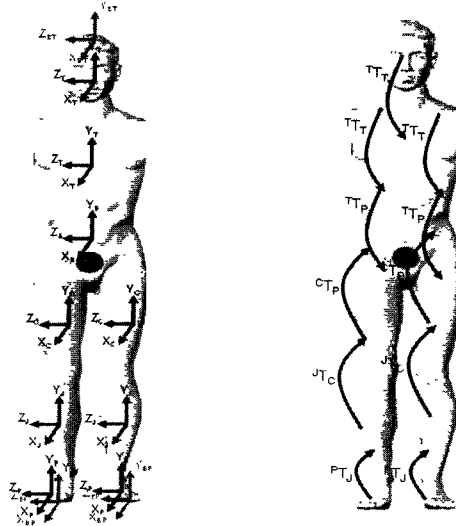


Figure 3 14. *Définition des différents repères associés aux segments corporels (calcul d'angles articulaires en prenant le bassin comme effecteur)*

Vingt quatre angles articulaires sont calculés par la procédure décrite ci-dessus. Vingt valeurs sont retenues (correspondant aux 20 degrés de liberté de notre modèle (Cf. Chapitre 2), auxquelles s'ajoutent 9 valeurs d'orientation spatiale des 3 bases (les pieds et la tête) par rapport au repère lié au véhicule.

3.3.7 Adaptation des angles articulaires

Les angles articulaires calculés ne permettent pas la reconstruction fidèle du mouvement. En d'autres termes, le fait d'injecter ces angles calculés à partir de structures non rigides ayant des articulations complexes (le corps humain) dans une structure à corps rigides possédant des articulations élémentaires (le modèle du corps humain) induit des trajectoires erronées lors de l'animation du mouvement. Ces trajectoires erronées peuvent provoquer des mouvements non désirables (comme la collision de la structure virtuelle représentative du corps humain avec les différentes parties du véhicule). Pour minimiser ce problème, Lempereur et al. (Lempereur et al., 2003) proposent une procédure qui minimise à chaque pas de temps la distance entre la trajectoire reconstruite (à l'aide du modèle) et la trajectoire désirée (la trajectoire mesurée par le système optoélectronique) du pied. Cette procédure donne de bons résultats lorsqu'il s'agit de corriger les trajectoires des pieds. Néanmoins, rien dans cette procédure ne permet d'éviter d'éventuelles collisions des autres points attachés aux membres inférieurs (chevilles et genoux) avec le véhicule. Une nouvelle procédure d'optimisation est proposée ci-après.

La procédure considère les trajectoires des points anatomiques suivants : les bouts de pieds, les chevilles, les genoux, L5, C7 et le vertex. Cette procédure consiste à minimiser à chaque pas de temps la distance entre les trajectoires reconstruites (via le modèle) et les trajectoires désirées (mesurées) de ces points.

3.3.7.1 Hypothèses

Nous supposons que :

- L'humanoïde retenu est suffisamment représentatif de l'être humain.
- Les angles articulaires adaptés (recherchés) sont voisins des angles articulaires calculés.

3.3.7.2 Adaptation du mouvement

La procédure consiste à minimiser à chaque pas de temps la somme des erreurs calculées entre les trajectoires reconstruites et les trajectoires mesurées (des points précédemment cités). Les contraintes retenues sont tirées de (Lempereur, 2006). La formulation mathématique de ce problème d'optimisation est donnée par l'expression suivante :

$$\min \sum_{i=1}^N \|X_{di}(t) - X_i(t)\| = \min \sum_{i=1}^N \|X_{di}(t) - f_i(\theta_j(t))\| \quad [3.10]$$

Avec :

- N le nombre de points anatomiques considérés (N= 9 dans notre étude).
- $\|\cdot\|$ le symbole de la norme euclidienne.
- $\theta_j(t)$, avec $j=1\dots 7$ (pour la chaîne « Membres Inférieur » (Cf. Chapitre 2)) et $j=1\dots 6$ (pour la chaîne « Tronc + Tête » (Cf. Chapitre 2)), les angles articulaires à adapter (recherchés) à chaque pas de temps.
- f_i , modèle géométrique direct donnant la position de chaque point anatomique i (Cf. Chapitre 2).
- $X_{di}(t)$, les trajectoires désirées (les trajectoires mesurées par le système optoélectronique) à chaque pas de temps.

La procédure proposée est itérative. Elle utilise les angles articulaires calculés au début du mouvement d'entrée (à l'instant $t=0$) comme valeurs initiales.

L'expression finale de la procédure d'optimisation est donnée par l'expression suivante :

$$\min \sum_{i=1}^N \|X_{di}(t) - f_i(\theta_j(t))\| \quad [3.11]$$

$$\begin{cases} S.C1. & \theta_{j \min} \leq \theta_j(t) \leq \theta_{j \max} \\ S.C2. & |\theta_j(t) - \theta_{j,Exp}(t)| \leq \varepsilon_j \\ S.C3. & |\theta_j(t) - \theta_j(t-1)| \leq V_j \end{cases}$$

La première contrainte (SC1) impose aux angles articulaires recherchés (adaptés) de se situer dans les marges d'amplitudes admissibles d'un point de vue physiologique (Kapandji, 1974 et 1975).

La deuxième contrainte (SC2) impose aux angles articulaires recherchés (adaptés) d'être voisins des angles calculés. Les ε_j sont déterminés après plusieurs séries de test-erreur. Ces valeurs sont les mêmes pour tous les sujets quelque soit la stratégie du mouvement d'entrée adoptée. Pour les chaînes « Membre Inférieur », les valeurs définies par Lempereur (Lempereur, 2006) sont retenues. Ces valeurs sont rapportées dans le tableau 3.12.

Articulation	Valeur de ε_j
Hanche droite/gauche	
- Flexion/Extension	4°
- Abduction/Adduction	12°
- Rotation interne/externe	13°
Genou droit/gauche	
- Flexion/Extension	15°
- Rotation interne/externe	10°
Cheville droite/gauche	
- Flexion/Extension	10°
- Abduction/Adduction	7°

Tableau 3 12. Valeur de tolérance pour chaque articulation des chaînes «Membres Inférieurs » (Lempereur, 2006).

Pour la chaîne « Tronc + Tête », les valeurs de tolérance sont données dans le tableau 3.13. Les valeurs de tolérance pour cette chaîne sont relativement plus importantes compte tenu du modèle adopté pour le tronc (une articulation contre 24 en réalité (Kapandji, 1975)).

Articulation	Valeur de ε_j
Articulation reliant les deux parties du tronc (L5)	
- Flexion/Extension	19°
- Abduction/Adduction	17°
- Rotation interne/externe	13°
Articulation reliant le tronc à la tête	
- Flexion/Extension	23°

- Abduction/Adduction	17°
- Rotation interne/externe	13°

Tableau 3 13. Valeur de tolérance pour chaque articulation de la chaîne rassemblant le « Tronc + Tête ».

La troisième contrainte (SC3) concerne la continuité des angles articulaires adaptés (recherchés). Cette contrainte permet d'éviter d'éventuelles discontinuités qui peuvent apparaître sur les angles articulaires et cela entre deux instants successifs. V_j est la variation maximale autorisée pour un angle articulaire recherché entre deux instants successifs. Les variations maximales des angles articulaires dépendent des sujets et de la stratégie motrice adoptée. A titre d'exemple, les tableaux 3.14 et 3.15 rapportent les valeurs pour un sujet de sexe féminin, âgé de 72 ans et sans déficience motrice adoptant la sous stratégie MM (le sujet 25 de la base de mouvements, (Cf. Annexe A.3.4).

Articulation	Valeur de V_j
Hanche droite/gauche	
- Flexion/Extension	4.56°/4.54°
- Abduction/Adduction	1.99°/1.54°
-Rotation interne/externe	3.67°/4.75°
Genou droit/gauche	
- Flexion/Extension	5.85°/4.03°
- Rotation interne/externe	4.46°/4.51°
Cheville droite/gauche	
- Flexion/Extension	4.88°/5.02°
- Abduction/Adduction	3.74°/4.98°

Tableau 3 14. Variation maximale de chaque angle articulaire des chaînes « Membre Inférieur » pour un sujet de sexe féminin, âgée de 72 ans, n'ayant pas de déficience motrice et adoptant la stratégie MM (Cf. Chapitre 4) lors de son mouvement d'entrée.

Articulation	Valeur de V_j
Articulation reliant les deux parties du tronc (à hauteur de T10)	
- Flexion/Extension	4.38°
- Abduction/Adduction	2.24°
- Rotation interne/externe	6.74°

Articulation reliant le tronc à la tête	
- Flexion/Extension	2.70°
- Abduction/Adduction	6.01°
- Rotation interne/externe	4.40°

Tableau 3 15. *Variation maximale de chaque angle articulaire de la chaîne « Tronc + Tête » pour un sujet de sexe féminin, âgée de 72 ans, n’ayant pas de déficience motrice et adoptant la stratégie MM (Cf. Chapitre 4) lors de son mouvement d’entrée.*

Le problème d’optimisation est résolu à l’aide du « Programme Séquentiel Quadratique » (SQP) tiré des outils d’optimisation de Matlab®.

3.3.7.3 Résultats de l’adaptation des angles articulaires

Dans un premier paragraphe, les trajectoires des points anatomiques reconstruits à partir des angles calculés et mesurés sont présentées.

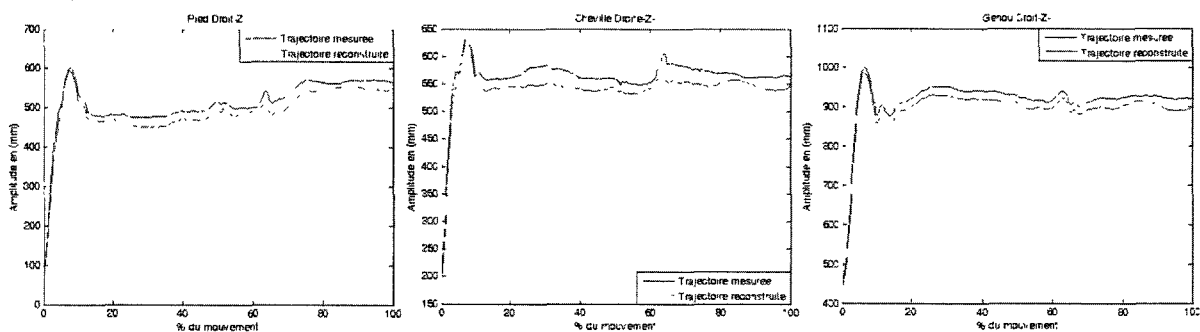
Dans un second paragraphe, les trajectoires des points anatomiques reconstruits à l’aide des angles adaptés sont comparées aux précédentes.

Un dernier paragraphe compare les trajectoires issues de la méthode de Lempereur et al. (Lempereur et al., 2003) et la méthode proposée.

Les résultats obtenus sont similaires quelque soit le sujet, la stratégie et le véhicule. Les paragraphes suivants illustrent ces résultats à partir d’un unique exemple. Il concerne un sujet de sexe féminin, âgé de 72 ans, n’ayant pas de déficience motrice et adoptant la stratégie MM (Cf. Chapitre 4) (le sujet 25 de la base de mouvements (Cf. Annexe A.3.4)). Seules les trajectoires suivant l’axe Z sont présentées.

a- Trajectoires reconstruites à partir des angles calculés versus mesurés

La figure 3.15 présente les trajectoires mesurées (via le système optoélectronique) et les trajectoires reconstruites à l’aide des angles calculés.



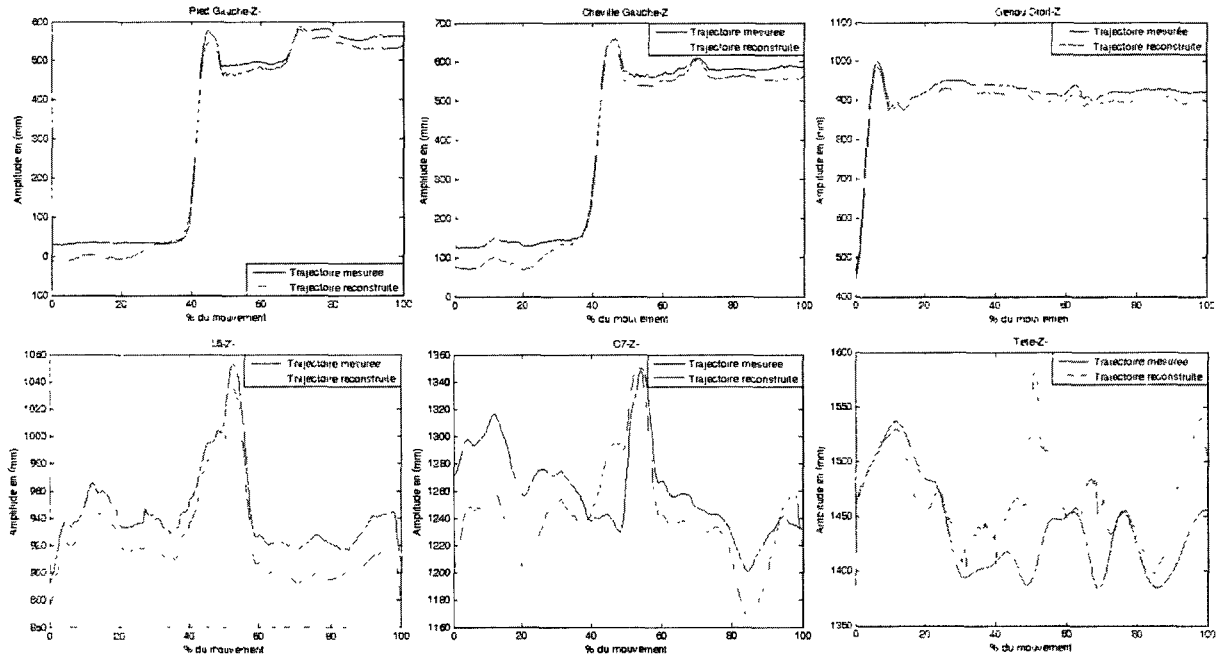
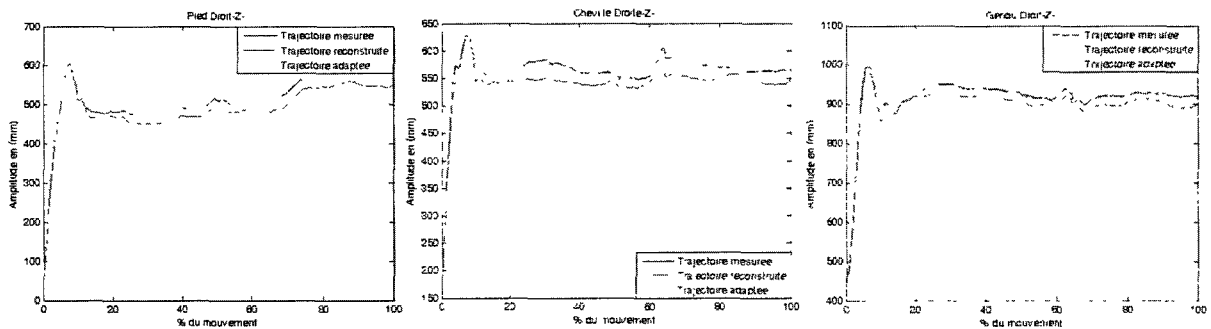


Figure 3 15. Trajectoires mesurées par le système optoélectronique et reconstruites à l'aide des angles calculés, des pieds, chevilles, genoux, L5, C7 et le vertex pour un sujet de sexe féminin, âgée de 72 ans, n'ayant pas de déficience motrice et adoptant la stratégie MM (Cf. Chapitre 4) lors de son mouvement d'entrée.

Des différences sont observées entre les trajectoires mesurées et reconstruites surtout pour les points anatomiques appartenant à la chaîne « Tronc + Tête ». Ces erreurs peuvent induire d'éventuelles collisions de l'humanoïde (surtout la tête) avec les différentes parties du véhicule.

b- Trajectoires reconstruites à partir des angles adaptés

La figure 3.16 présente les trajectoires mesurées, reconstruites à l'aide des angles articulaires calculés et reconstruites à l'aide des angles articulaires adaptés (dites trajectoires adaptées).



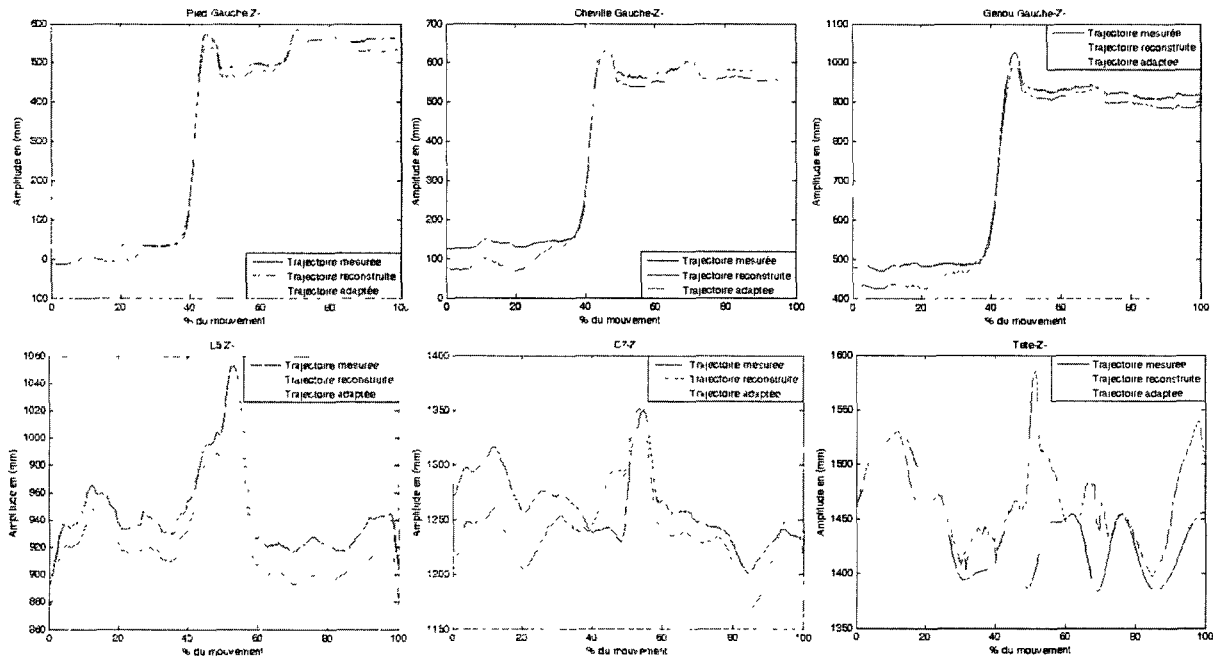


Figure 3 16. Trajectoires mesurées, reconstruites et adaptées par notre procédure, des pieds, chevilles, genoux, L5, C7 et le vertex pour un sujet de sexe féminin, âgée de 72 ans, n'ayant pas de déficience motrice et adoptant la stratégie MM (Cf. Chapitre 4) lors de son mouvement d'entrée.

Dans l'ensemble, les différentes trajectoires des points anatomiques sont améliorées suite à l'adaptation des angles articulaires.

C. Comparaison entre la méthode de Lempereur et al. (Lempereur et al., 2003) et celle proposée

La figure 3.17 présente un zoom sur les trajectoires mesurées, reconstruites à partir des angles adaptés par la méthode de Lempereur et al. (Lempereur et al., 2003) et par notre méthode d'adaptation.

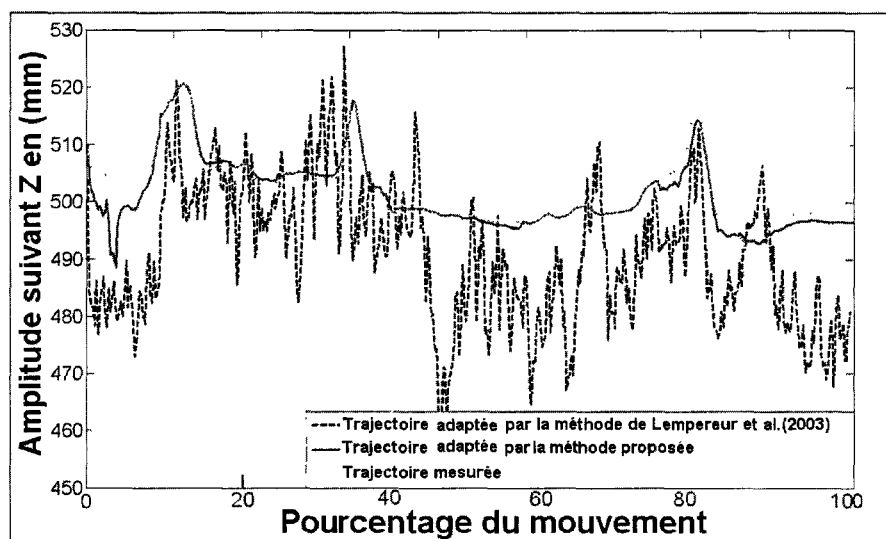


Figure 3 17. Zoom sur une partie de la trajectoire de la cheville droite, mesurée, reconstruite à partir des angles adaptés par la procédure de Lempereur et al. (Lempereur et al., 2003), et par la procédure d'adaptation proposée, pour un sujet de sexe féminin, âgée de 72 ans, n'ayant pas de déficience motrice et adoptant la stratégie MM (Cf. Chapitre 4) lors de son mouvement d'entrée.

La figure 3.17 montre que la trajectoire reconstruite à l'aide des angles adaptés par la méthode de Lempereur et al. (Lempereur et al., 2003) présente des fluctuations. Alors que la trajectoire reconstruite à l'aide des angles adaptés par notre méthode suit bien la trajectoire mesurée.

Le tableau 3.16 présente les RMS entre les trajectoires mesurées et reconstruites à partir des angles adaptés par la méthode de Lempereur et al. (Lempereur et al., 2003) et par notre méthode d'adaptation.

	Angles calculés	Angles adaptés par la méthode de Lempereur et al. (2003)	Angles adaptés par la méthode proposée
Pied droit	39.98	0	3.77
Cheville droite	56.35	18.78	5.40
Genou droit	72.40	52.12	20.58
Pied gauche	52.83	1.65	7.99
Cheville gauche	66.98	24.1	15.65
Genou gauche	82.47	57.64	32.64
L5	11.84	11.84	6.84
C7	34.91	85.38	25.11
Tête	124.91	15.26	23.3

Tableau 3 16. RMS (en mm) calculées entre les trajectoires mesurées, reconstruites à partir des angles adaptés par la méthode de Lempereur et al. (Lempereur et al., 2003) et par notre méthode d'adaptation.

L'application de la méthode de Lempereur et al. (Lempereur et al., 2003) améliore les trajectoires des bouts de chaînes (les pieds et la tête). Alors qu'elle améliore peu les autres trajectoires comme les trajectoires des genoux et L5. D'autres trajectoires sont même dégradées par rapport aux trajectoires reconstruites par le modèle (c'est le cas avec la trajectoire de C7). Notre méthode est moins bonne pour les trajectoires des bouts de chaînes (les pieds et la tête) par rapport à la méthode de Lempereur et al. (Lempereur et al., 2003). Elle est nettement meilleure, néanmoins, dans l'adaptation des autres trajectoires.

La méthode proposée améliore globalement les trajectoires des points anatomiques. Elle est donc retenue pour l'adaptation des angles articulaires, données mémorisées dans la base de mouvements exploitables.

3.3.8 Découpage du mouvement d'entrée

L'objectif de cette partie est de présenter le découpage temporel du mouvement d'entrée en trois phases et de préciser la phase considérée dans la suite de l'étude. Le mouvement d'entrée commence quand le sujet pose sa main sur la poignée de la voiture lors de l'ouverture de la portière et se termine une fois le sujet à l'intérieur de la voiture, ces mains posées sur le volant et prêt à conduire.

Le mouvement d'entrée est décomposée en trois sous phases (Ait El Menceur et al., 2006) (Cf. Fig. 3.18) :

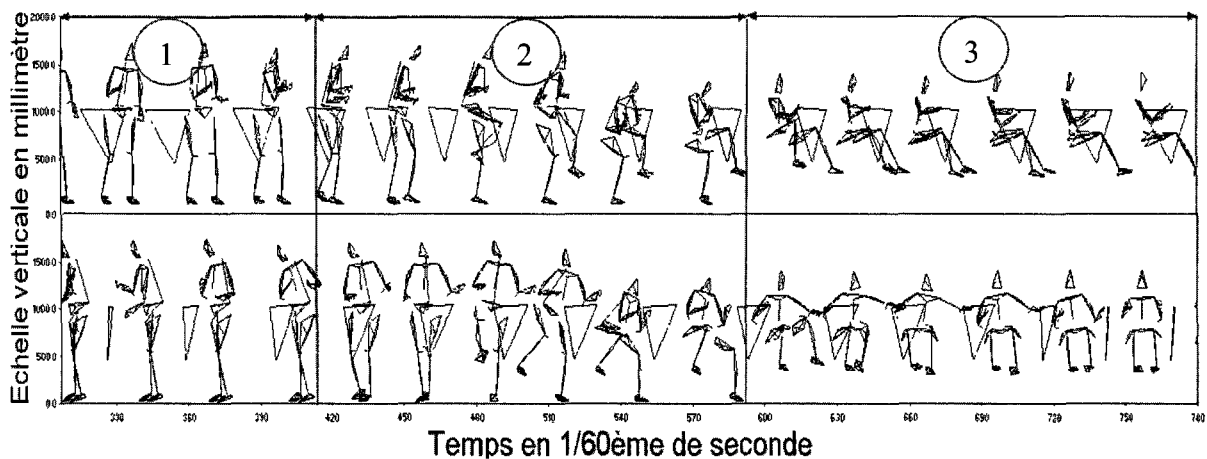


Figure 3 18. *Découpage du mouvement d'entrée en trois sous phases : phase d'ouverture de la portière (1), phase d'adaptation du mouvement d'entrée (2) et la phase de positionnement sur le siège (3)*

- *Phase d'ouverture de la portière.* Cette phase commence quand le sujet pose la main sur la poignée de la portière, et se termine avec l'ouverture suffisante de la portière de sorte à autoriser le mouvement d'entrée.

- *Phase d'adaptation du mouvement d'entrée.* Cette phase commence quand le sujet décolle son pied droit du sol. Elle se termine avec le soulèvement du pied gauche du sol avant son entrée dans le véhicule. Lors de cette phase le sujet entre en interaction avec le véhicule et adapte son mouvement en fonction de la géométrie du véhicule. Les stratégies motrices d'entrée dans un véhicule automobile, identifiées par Ait El Menceur et al. (Ait El Menceur et al., 2008a) se distinguent mieux lors de cette phase (Cf. Chapitre 1).
- *Phase de positionnement sur le siège.* Cette phase commence avec le décollement du pied gauche du sol avant son entrée dans le véhicule. Elle se termine dès que les pieds sont immobiles sur le plancher du véhicule et les mains du sujet positionnées sur le volant.

Dans la présente étude, seule la phase 2 du mouvement d'entrée est considérée. Le début (resp. la fin) est détecté à partir de la trajectoire, suivant l'axe Z, du point milieu construit à l'aide des marqueurs apposés au niveau du premier et cinquième métatarse du pied droit (resp. gauche).

La figure 3.19 présente les trajectoires des pieds droit et gauche, les instants de début et de fin de la phase d'adaptation du mouvement d'entrée y sont par ailleurs précisés.

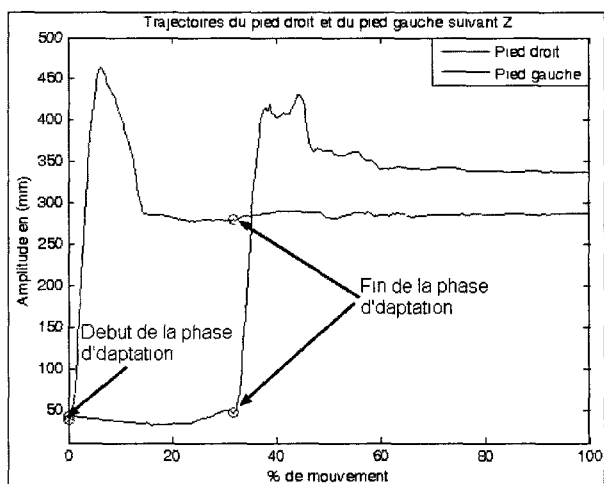
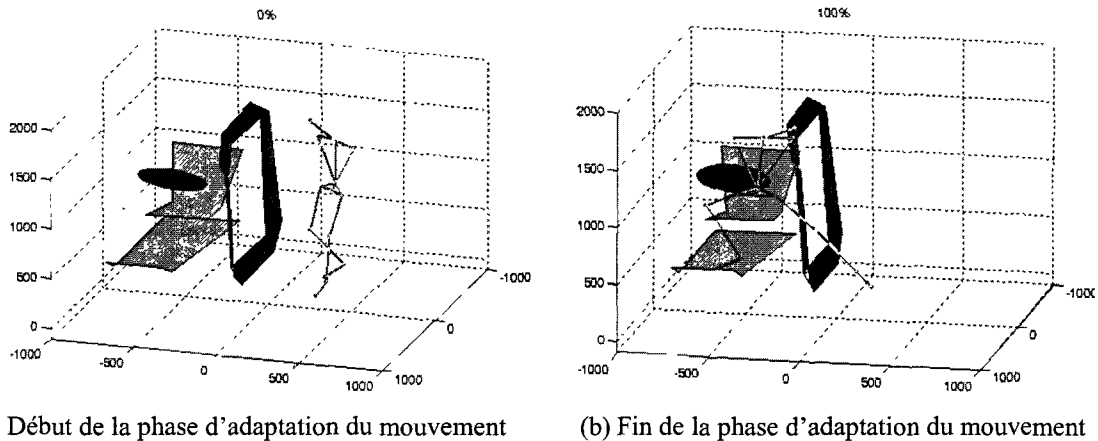


Figure 3 19. *Illustration des instants de début et de fin de la phase d'adaptation du mouvement d'entrée sur les trajectoires du pied droit et gauche.*

La figure 3.20 illustre les postures adoptées lors des instants de début et de fin de la phase d'adaptation du mouvement d'entrée dans un véhicule automobile (pour la stratégie à 1 pied).



(a) Début de la phase d'adaptation du mouvement (b) Fin de la phase d'adaptation du mouvement

Figure 3 20. Postures adoptées lors du début et de fin de la phase d'adaptation du mouvement d'entrée dans un véhicule automobile.

3.3.9 Normalisation en temps et en amplitude des angles articulaires

La normalisation des angles articulaires vise à exprimer les angles articulaires sur une même échelle de temps quelque soit la durée initiale de l'entrée dans le véhicule automobile. Un sur échantillonnage à l'aide de splines cubiques est appliqué dans une première phase aux angles articulaires (adaptés) afin de compléter les données manquantes de sorte à obtenir 1000 données temporelles pour chaque angle articulaire. Puis, un sous échantillonnage est appliqué à ces données de manière à obtenir 50 valeurs par angle articulaire comme dans (Lempereur, 2006). Enfin, ces 50 valeurs sont centrées et réduites sur l'intervalle $[0,1]$ selon l'équation [3.12].

$$x_{[0,1]} = \frac{x - Min}{Max - Min} \quad [3.12]$$

avec x , la valeur de l'angle articulaire, $x_{[0,1]}$, la valeur de l'angle articulaire projetée sur l'intervalle $[0,1]$, Max , la valeur maximale de l'angle articulaire considéré rencontré quelque soit le sujet et Min , la valeur minimale de l'angle articulaire considéré rencontré quelque soit le sujet.

3.3.10 Conclusion

Cette deuxième partie a présenté les traitements appliqués aux données mesurées (les coordonnées 3D des marqueurs) afin d'appliquer les méthodes proposées au Chapitre 2. Successivement sont précisés :

- l'estimation de la position du marqueur L5 après occultation,
- l'estimation des centres articulaires,
- le filtrage des données 3D,

- l'expression des coordonnées des marqueurs apposés sur chaque sujet dans le repère véhicule,
- le calcul des angles articulaires en considérant successivement le bassin comme origine et comme effecteur,
- l'adaptation des angles articulaires afin de limiter les écarts constatés entre les trajectoires de points anatomiques mesurés et reconstruites à l'aide du MGD.
- Découpage du mouvement d'entrée.
- Et enfin, la normalisation des angles articulaires.

3.4 CONCLUSION

Ce chapitre a présenté les étapes nécessaires à la construction de la base de mouvements pour la simulation. Dans une première partie, le dispositif et le protocole expérimental sont détaillés. Deux véhicules sont retenus : un « grand véhicule » (le monospace PEUGEOT 806) et un « petit véhicule » (le FORD Fiesta 1^{ère} génération). La capture des mouvements d'entrée est réalisée à l'aide du système optoélectronique de capture de mouvement tridimensionnel Vicon® 612. Les mouvements de 33 sujets sur le « petit véhicule » et ceux de 37 sujets sur le « grand véhicule » constituent les mouvements bruts exploitables en sortie d'expérimentation. Divers traitements leurs sont alors appliqués afin d'obtenir les données utiles à l'application des méthodes décrites au chapitre 2. Ces traitements sont précisés dans la deuxième partie de ce chapitre.

Au terme de ce travail, la base de mouvements est constituée. Elle contient les coordonnées 3D des marqueurs apposés sur le sujet exprimées dans le repère véhicule et les angles articulaires normalisés calculés selon les 2 modes de calculs nécessaires pour l'ensemble des mouvements d'entrée exploitables. Les méthodes proposées peuvent être appliquées. Le chapitre suivant présente les résultats issus de l'application des différentes étapes de notre démarche.

CHAPITRE 4
RESULTATS

CHAPITRE 4 : RESULTATS

4.1 INTRODUCTION

Ce chapitre présente les résultats obtenus suite à l'application de la méthodologie proposée pour simuler la cinématique du mouvement d'entrée dans un véhicule automobile. Dans une première partie nous explicitons les stratégies et sous stratégies d'entrée identifiées à partir de l'analyse réalisée sur la base de mouvements « exploitables ». Ces résultats sont comparés à ceux obtenus, via l'observation, par Ait El Menceur et al. (Ait El Menceur et al., 2008a) pour valider leur pertinence. Puis, dans un second temps nous présentons les résultats de simulation. Plusieurs exemples sont traités, de la simple vérification à l'utilisation du simulateur comme outil d'aide à l'interprétation des changements de stratégie observée dans (Ait El Menceur et al., 2008a) et confirmés dans la présente thèse.

4.2 IDENTIFICATION DES STRATEGIES D'ENTREE

Cette première partie présente les stratégies et sous stratégies d'entrée identifiées. La présentation adoptée est conforme à la démarche proposée en figure 2.5 du chapitre 2. Successivement, la démarche est appliquée au « petit véhicule », puis au « grand véhicule ». Chaque stratégie et sous stratégie identifiée est décrite précisément. Enfin, les résultats obtenus sont discutés au regard de l'existant.

4.2.1 Identification des stratégies et sous stratégies d'entrée pour le « petit véhicule »

4.2.1.1 Etapes a et b : Détermination des stratégies « principales » du mouvement d'entrée

L'indice 3BJCV est calculé pour chacun des 33 sujets retenus sur le « petit véhicule ». La figure 4.1 présente le dendrogramme obtenu lors de la Classification Hiérarchique Ascendante appliquée à ces indices. Cette figure suggère (montre) l'existence de 2 grandes classes de stratégies d'entrée. La première compte 27 sujets et la seconde 6 sujets. Ces 2 classes regroupent respectivement les sujets entrant avec la stratégie dite à « 1 pied » (27 sujets) et les sujets entrant avec celle dite à « 2 pieds » (6 sujets).

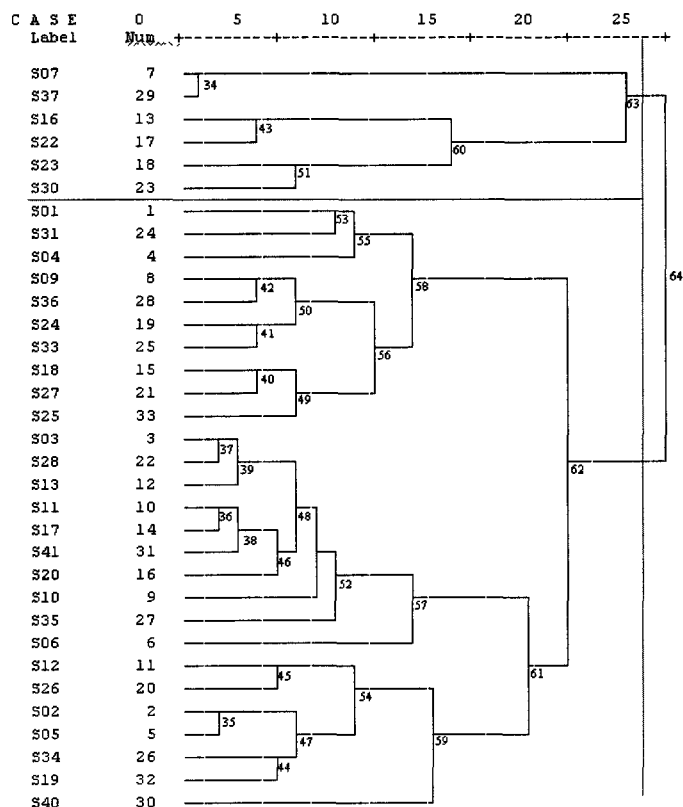


Figure 4 1. Dendrogramme de la CHA réalisée sur les indices 3BJCV calculés pour les 33 sujets entrant dans le « petit véhicule ».

4.2.1.2 Etapes c et d : Détermination des sous stratégies du mouvement d’entrée

L’AFCM est appliquée aux angles articulaires normalisés définissant l’orientation spatiale de chaque chaîne cinématique de notre modèle (calculés avec le bassin comme racine). Les tableaux 4.1, 4.2 et 4.3 présentent les contributions relatives des différents angles articulaires dans la construction des 2 axes du premier plan factoriel (représentant respectivement, 72.07%, 79.74% et 72.66% de la variance totale) respectivement pour la chaîne « Membre Inférieur » droit, la chaîne « Membre Inférieur » gauche et la chaîne « Tronc + Tête ».

	Axe 1	Axe 2
	Contribution relative (%)	Contribution relative (%)
Flexion/extension de la hanche	32.92	43.75
Abduction/adduction de la hanche	0.11	7.60
Rotation interne/externe de la hanche	0.90	24.55
Flexion/extension du genou	65.83	18.64
Rotation interne/externe du genou	0.01	0.00
Flexion/extension de la cheville	0.07	5.05
Abduction/adduction de la cheville	0.15	0.41

Tableau 4 1. Contributions relatives des angles articulaires définissant l'orientation spatiale de la chaîne « Membre Inférieur » droit dans la constitution des 2 axes du premier plan factoriel pour le « petit véhicule ».

	Axe 1	Axe 2
	Contribution relative (%)	Contribution relative (%)
Flexion/extension de la hanche	42.09	6.55
Abduction/adduction de la hanche	2.71	4.82
Rotation interne/externe de la hanche	6.57	0.72
Flexion/extension du genou	48.43	2.81
Rotation interne/externe du genou	0.18	53.22
Flexion/extension de la cheville	0.00	6.16
Abduction/adduction de la cheville	0.01	25.70

Tableau 4 2. Contributions relatives des angles articulaires définissant l'orientation spatiale de la chaîne « Membre Inférieur » gauche dans la constitution des 2 axes du premier plan factoriel pour le « petit véhicule ».

	Axe 1	Axe 2
	Contribution relative (%)	Contribution relative (%)
Flexion/extension de L5	56.93	4.15
Abduction/adduction de L5	0.80	0.20
Rotation interne/externe de L5	0.33	26.62
Flexion/extension de C7	28.83	0.80
Abduction/adduction de C7	11.49	3.80
Rotation interne/externe de C7	1.63	64.43

Tableau 4 3. Contributions relatives des angles articulaires définissant l'orientation spatiale de la chaîne « Tronc + Tête » dans la constitution des 2 axes du premier plan factoriel pour le « petit véhicule ».

Dans Pudlo et al. (Pudlo et al., 2008), les angles articulaires dont la contribution relative est supérieure ou égale à 10% peuvent être considérés comme « pertinents ». Par conséquent, les angles articulaires « pertinents », pour le mouvement d'entrée dans le « petit véhicule », sont : la flexion/extension de la hanche droite, la rotation interne/externe de hanche droite, la flexion/extension genou droit, la flexion/extension hanche gauche, flexion/extension du genou gauche, la rotation interne/externe du genou gauche, l'abduction/adduction de la cheville gauche, la flexion/extension de L5, la rotation interne/externe de L5, la flexion/extension de C7, l'abduction/adduction de C7 et la rotation interne/externe de C7.

La figure 4.2 présente le dendrogramme obtenu avec la Classification Hiérarchique Ascendante appliquée aux angles articulaires « pertinents » pour les sujets appartenant à la première grande classe (les sujets utilisant la stratégie dite à « 1 pied ») entrant dans le « petit véhicule ». Cette figure suggère l’existence de 3 classes d’entrée à 1 pied dans le « petit véhicule ». La première classe compte 5 sujets, la seconde 7 sujets et la troisième 15 sujets.

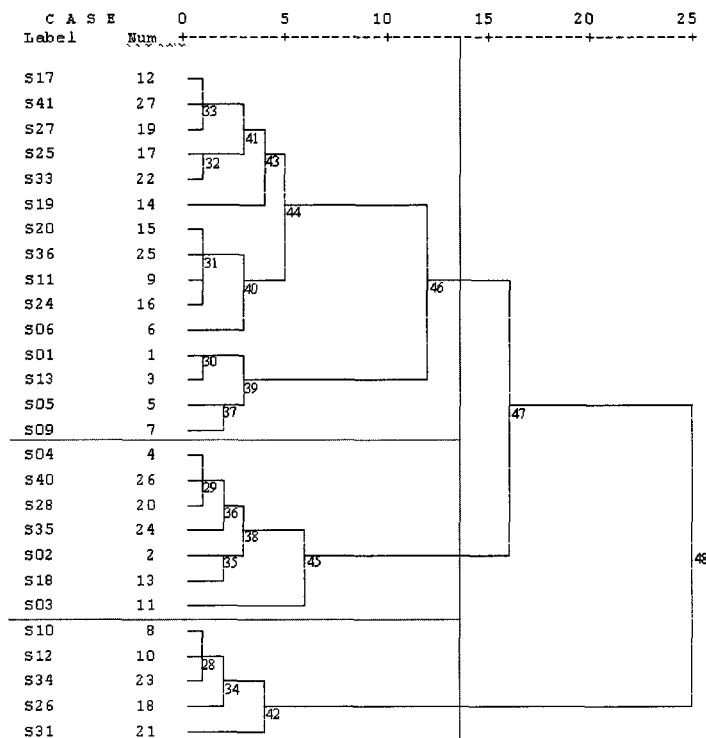


Figure 4 2. Dendrogramme de la CHA réalisée sur les angles articulaires pour les sujets pratiquant la première grande stratégie, la stratégie d’entrée à 1 pied, dans le « petit véhicule ».

Les sujets appartenant à la première classe se retrouvent en totalité dans la classe LS (« Lateral Sliding »), ceux appartenant à la deuxième classe sont en totalité dans la classe BM (« Backward Motion ») et enfin ceux appartenant à la troisième classe se retrouvent répartis entre les classes LS et BM de Ait El Menceur et al. (Ait El Menceur et al., 2008a).

La figure 4.3 présente le dendrogramme obtenu de la Classification Hiérarchique Ascendante appliquée aux angles articulaires « pertinents » pour les sujets de la deuxième grande classe (sujets utilisant la stratégie dite à « 2 pieds ») entrant dans « le petit véhicule ». Cette figure suggère l’existence de 2 classes, chacune rassemblant 3 sujets. La première correspond à la classe dite TB (« Trunk Backward ») (TAR en Français), la seconde correspond à la classe dite TF (« Trunk Forward ») (TA en Français).

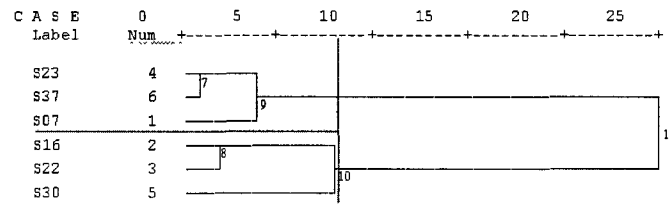


Figure 4 3. Dendrogramme de la CHA réalisée sur les angles articulaires pour les sujets pratiquant la deuxième grande stratégie, la stratégie d'entrée à 2 pieds, dans le « petit véhicule ».

4.2.2 Identification des stratégies et sous stratégies d'entrée pour le « grand véhicule »

4.2.2.1 Etapes a et b : Détermination des stratégies principales du mouvement d'entrée

L'indice 3BJCV est calculé pour chacun des 37 sujets retenus avec le « grand véhicule ». La figure 4.4 présente le dendrogramme issue de la Classification Hiérarchique Ascendante appliquée à ces indices. Cette figure montre également l'existence de 2 grandes classes d'entrée dans le « grand véhicule ». La première grande classe compte 31 sujets et la seconde 6 sujets. Ces 2 classes rassemblent les sujets utilisant la stratégie dite entrant à « 1 pied » (31 sujets) et ceux entrant à « 2 pieds » (6 sujets).

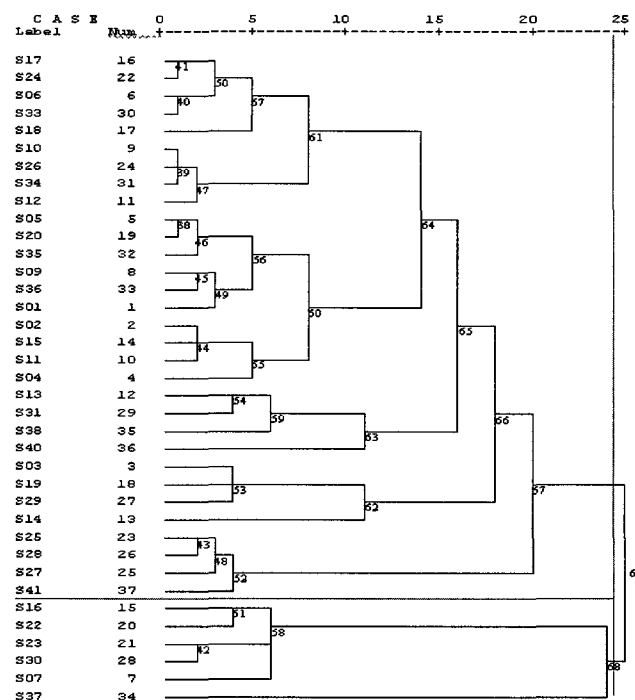


Figure 4 4. Dendrogramme de la CHA réalisée sur les indices 3BJCV calculés pour les 37 sujets entrant dans le « grand véhicule ».

4.2.2.2 Etapes c et d : Détermination des sous stratégies du mouvement d'entrée

L'AFCM est appliquée aux angles articulaires normalisés définissant l'orientation spatiale de chaque chaîne cinématique de notre modèle (calculés avec le bassin comme racine). Les tableaux 4.4, 4.5 et 4.6 présentent les contributions relatives des différents angles articulaires dans la construction des 2 axes du premier plan factoriel (représentant respectivement 75.20%, 76.36% et 71.75% de la variance totale) pour les chaînes « Membre Inférieur » droit, « Membre Inférieur » gauche et « Tronc + Tête ».

	Axe 1	Axe 2
	Contribution relative (%)	Contribution relative (%)
Flexion/extension de la hanche	40.01	30.98
Abduction/adduction de la hanche	2.60	18.22
Rotation interne/externe de la hanche	0.21	2.41
Flexion/extension du genou	55.87	32.66
Rotation interne/externe du genou	0.34	0.04
Flexion/extension de la cheville	0.12	15.67
Abduction/adduction de la cheville	0.85	0.00

Tableau 4 4. Contributions relatives des angles articulaires définissant l'orientation spatiale de la chaîne « Membre Inférieur » droit dans la constitution des 2 axes du premier plan factoriel pour « le grand véhicule ».

	Axe 1	Axe 2
	Contribution relative (%)	Contribution relative (%)
Flexion/extension de la hanche	68.55	0.89
Abduction/adduction de la hanche	3.30	17.96
Rotation interne/externe de la hanche	4.48	7.49
Flexion/extension du genou	18.89	5.86
Rotation interne/externe du genou	0.02	57.86
Flexion/extension de la cheville	6.30	0.02
Abduction/adduction de la cheville	1.16	9.92

Tableau 4 5. Contributions relatives des angles articulaires définissant l'orientation spatiale de la chaîne « Membre Inférieur » gauche dans la constitution des 2 axes du premier plan factoriel pour « le grand véhicule ».

	Axe 1	Axe 2
	Contribution relative (%)	Contribution relative (%)
Flexion/extension de L5	17.09	57.12
Abduction/adduction de L5	0.55	0.80
Rotation interne/externe de L5	3.83	6.77
Flexion/extension de C7	0.17	16.54
Abduction/adduction de C7	2.07	13.61
Rotation interne/externe de C7	76.30	5.16

Tableau 4 6. *Contributions relatives des angles articulaires définissant l'orientation spatiale de la chaîne « Tronc + Tête » dans la constitution des 2 axes du premier plan factoriel pour « le grand véhicule ».*

Les angles articulaires « pertinents », pour le mouvement d'entrée dans le « grand véhicule », sont donc : la flexion/extension de la hanche droite, Abduction/adduction de la hanche droite, la flexion/extension du genou droit, la flexion/extension de la cheville droite, la flexion/extension de la hanche gauche, l'abduction/adduction de la hanche gauche, la flexion/extension du genou gauche, la rotation interne/externe du genou gauche, la flexion/extension de L5, la flexion/extension de C7, l'abduction/adduction de C7 et la rotation interne/externe de C7.

La figure 4.5 présente le dendrogramme obtenu de la Classification Hiérarchique Ascendante appliquée aux angles articulaires « pertinents » pour les sujets de la première grande classe (les sujets entrant à « 1 pied ») entrant dans le « grand véhicule ». Cette figure suggère l'existence de 3 classes d'entrée à « 1 pied » dans le « grand véhicule ». La première compte 5 sujets, la seconde 6 sujets et la troisième 20 sujets. Les sujets appartenant à la première classe se retrouvent en totalité dans la classe FM (« Forward Motion ») ceux appartenant à la deuxième classe se retrouvent en totalité dans la classe LS (« Lateral Sliding ») et ceux de la troisième classe se retrouvent répartis entre les classes LS et BM de Ait El Menceur et al. (Ait El Menceur et al., 2008a). La classe BM (« Backward Motion ») n'est pas identifiée en tant que telle par la présente classification.

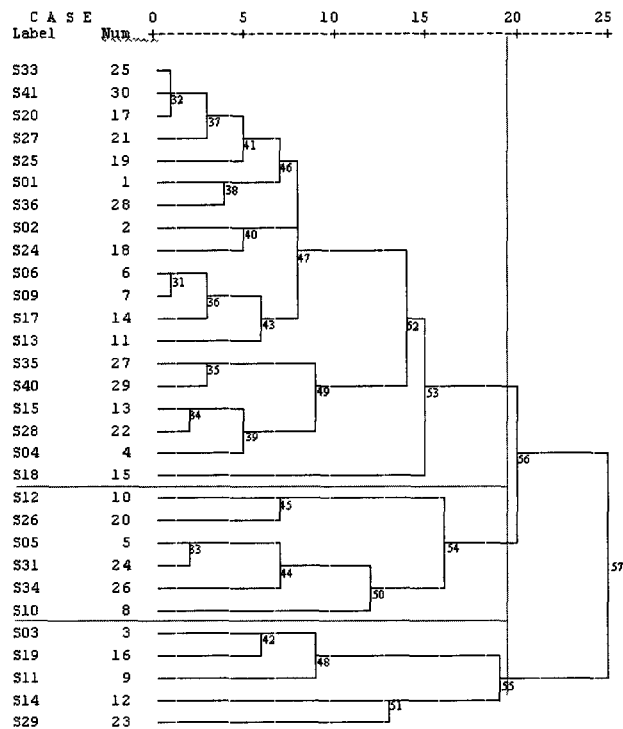


Figure 4 5. Dendrogramme de la CHA réalisée sur les angles articulaires pour les sujets pratiquant la première grande stratégie, la stratégie d'entrée à 1 pied, dans le « grand véhicule ».

La figure 4.6 présente le dendrogramme obtenu de la Classification Hiérarchique Ascendante appliquée aux angles articulaires pertinents pour les sujets de la deuxième grande classe (les sujets entrant à « 2 pieds ») entrant dans le « grand véhicule ». Cette figure suggère l'existence de 2 classes, chacune comptant 3 sujets. La première classe correspond à la classe dite TB (« Trunk Backward »), la seconde classe correspond à la classe dite TF (« Trunk Forward »).

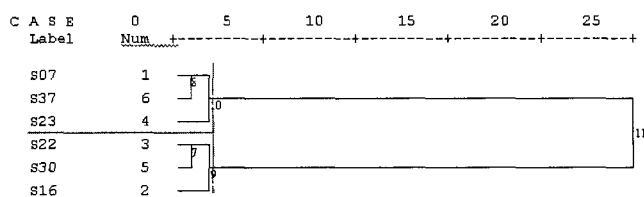


Figure 4 6. Dendrogramme de la CHA réalisée sur les angles articulaires pour les sujets pratiquant la deuxième stratégie, la stratégie d'entrée à 2 pieds, dans le « grand véhicule ».

4.2.3 Description des stratégies identifiées

Six (sous) stratégies ont été identifiées à partir du processus méthodologique quantitatif d'identification des stratégies d'entrée proposé. Certaines stratégies sont identiques à celles de Ait El Menceur et al. (Ait El Menceur et al., 2008a) dénombrées par observation à partir des mêmes données expérimentales, d'autres demandent à être précisées. Les

descriptions et les illustrations, qui vont suivre, sont réalisées à partir des postures extraites du mouvement d'entrée à 0%, 25%, 50%, 75% et 100% (de la phase d'adaptation du mouvement d'entrée).

4.2.3.1 La sous stratégie LS (« Lateral Sliding »)

Au début de la phase d'adaptation du mouvement, à 0%, les sujets regardent l'habitacle et se pré positionnent pour entrer dans le véhicule. A 25%, les sujets combinent un mouvement de flexion du genou droit avec une légère abduction de la hanche droite, mouvement qui leurs permet de placer (déjà à ce stade) leur genou droit à droite du volant. A cet instant, ils réalisent également une légère flexion de la tête et du tronc. A 50%, les sujets posent le pied droit sur le plancher. L'augmentation du fléchissement du genou droit et de l'abduction de la hanche droite leurs permettent d'éviter la collision avec le volant. Ces premiers mouvements sont suivis : d'une flexion du genou gauche d'amplitude variable selon la géométrie du véhicule (les amplitudes des mouvements sont significatives sur le petit véhicule), d'une flexion et d'une abduction du tronc et de la tête. A 75%, la stratégie se définit mieux, les angles sollicités à 50% du mouvement augmentent encore. La posture à cet instant est significative de la stratégie décrite. Enfin, les sujets terminent leur entrée dans le véhicule automobile tout en évitant l'habitacle lors de leurs mouvements.

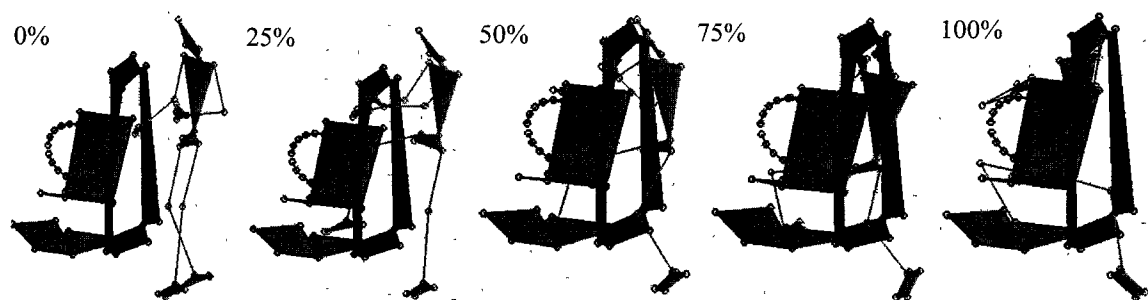


Figure 4 7. La stratégie LS (« lateral sliding »).

4.2.3.2. La stratégie BM (« Backward Motion »)

A 25% de la phase d'adaptation, les sujets se pré positionnent pour entrer dans le véhicule. Ils réalisent une adduction et une rotation interne de la hanche droite, une légère flexion du genou droit vers l'extérieur, fléchissent et orientent le tronc et la tête vers la droite de manière à voir l'habitacle. A 50%, les sujets accentuent l'adduction et la rotation interne de la hanche droite et la flexion du genou droit. Ces mouvements leurs permettent de poser le pied droit de manière éloignée à droite sur le plancher. Dans le même temps, leurs genou droit se positionne à gauche du volant. Pour entrer dans l'habitacle, les sujets tournent davantage la tête et le tronc vers la droite et fléchissent le genou gauche tout en se laissent tomber sur le siège. A 75% du mouvement, la posture clé caractérisant cette stratégie se définit. A cet instant, la moitié du corps a franchi la portière. Les sujets s'assoient sur le siège après une

adduction et une rotation interne de la hanche droite et une flexion du genou droit éloignant encore ainsi davantage le genou du volant. Le pied droit est alors très loin à l'intérieur du véhicule. Le tronc et la tête se placent à l'intérieur de l'habitacle tout en évitant la collision avec le brancard. Les sujets finissent le mouvement en décollant le pied gauche du sol. Cette stratégie exige une coordination motrice complexe (notamment en adduction et rotation interne de la hanche droite et flexion du genou droit). De tels mouvements semblent irréalisables sur le grand véhicule (compte tenu de la hauteur du plancher), ce qui pourrait expliquer sa pratique sur le petit véhicule.

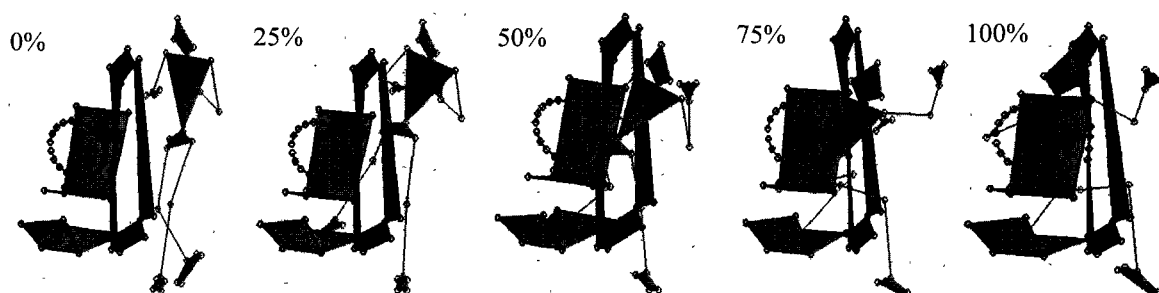


Figure 4 8. *La stratégie BM (« backward motion »).*

4.2.3.3 La stratégie MM (« Median Motion »)

Les sujets adoptant cette stratégie sont reparties entre les stratégies LS et BM dans (Ait El Menceur et al., 2008a). Cette répartition s'explique essentiellement car cette stratégie présente les caractéristiques des 2 stratégies (LS et BM) difficilement dissociable par l'observation. La différence provient de la position du genou droit, qui est dans la stratégie MM proche du volant (à droite ou à gauche) contrairement aux stratégies LS et BM (Cf. figures 4.7 et 4.8). Au regard des résultats, la réalisation de la stratégie MM apparaît plus commode sur le grand véhicule, qui présente un plancher relativement haut par rapport au petit véhicule. Cette stratégie est appelée « Median Motion strategy » car le genou droit prend une position intermédiaire entre celles adoptées lors de l'exécution des stratégies LS et BM.

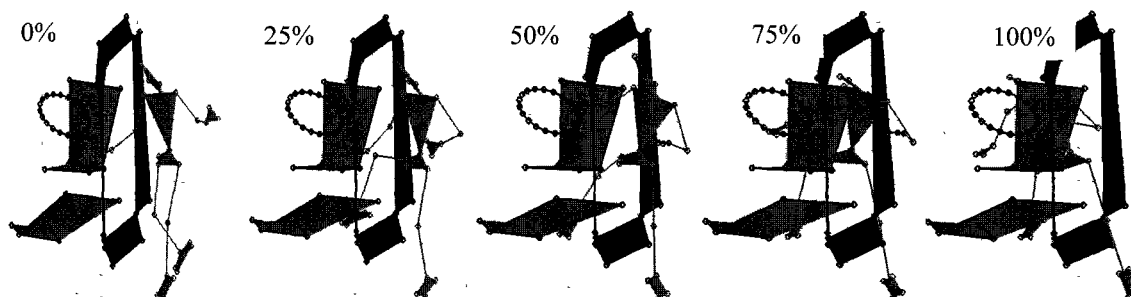


Figure 4 9. *La stratégie MM (Median Motion).*

4.2.3.4 La stratégie FM (« Forward Motion »)

A 0%, les sujets adoptant cette stratégie se positionnent face au véhicule. A 25%, ils réalisent une flexion importante du genou droit, suivie d'une flexion du genou gauche, tout en fléchissant la tête et le tronc. Ces mouvements permettant aux sujets de franchir la portière du véhicule sans collision avec le brancard. A 50%, les sujets fléchissent encore davantage la tête et le tronc et posent le pied droit sur le plancher et s'aident du volant pour entrer. A 75%, les sujets accentuent les mouvements engagés à 50% : le fléchissement du genou droit, la flexion de la tête et du tronc. A cet instant, la moitié de leur corps est entrée dans le véhicule. La posture adoptée est ici significative de la stratégie pratiquée. Enfin, les sujets s'assoient sur le siège et commencent la phase de positionnement sur le siège (Ait El Menceur et al., 2006). Tout comme dans (Ait El Menceur et al., 2008a), cette stratégie n'est rencontrée que dans le cas du grand véhicule.

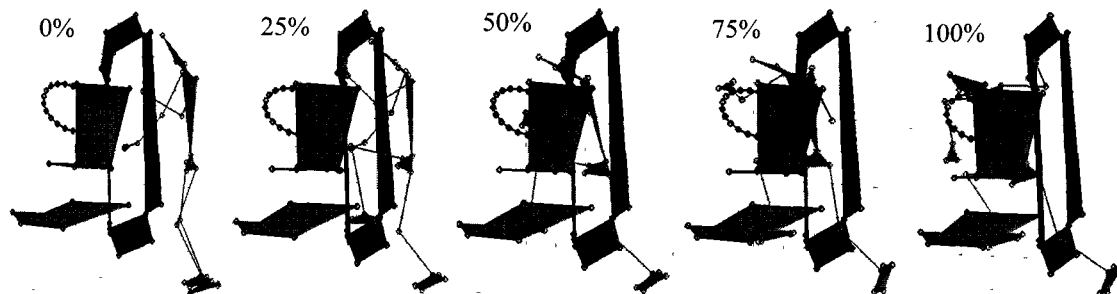


Figure 4 10. La stratégie FM (Forward motion) MA (Mouvement en Avant).

4.2.3.5 La stratégie TB (« Trunk Backward »)

A 0%, les sujets adoptant cette stratégie soulèvent le pied droit sans pour autant avoir l'intention de le mettre dans le véhicule. A 25%, ils posent à nouveau le pied droit au sol et pivotent autour de celui-ci pour se mettre dos au véhicule. A 50%, ils fléchissent les genoux, les hanches, la tête et le tronc tout en prenant appui sur certaines parties du véhicule (volant, siège). A 75%, les sujets accentuent les fléchissements engagés précédemment de manière à amorcer l'assise. Leur membre inférieur droit se lève lors de l'entrée tout en penchant le haut du tronc vers l'extérieur. Le soulèvement de la jambe droite est plus prononcé lors de l'entrée dans le petit véhicule. A nouveau, la posture adoptée à 75% représente bien la stratégie pratiquée. Enfin, les sujets s'assoient sur le siège tout en s'appuyant sur celui-ci, décollent leur jambes (les 2 séquentiellement ou simultanément selon le véhicule) tout en gardant la tête et le tronc penchés vers l'extérieur du véhicule.

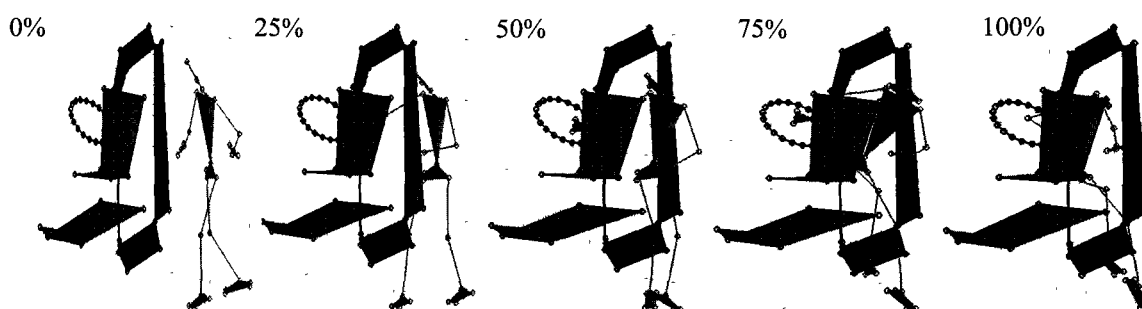


Figure 4 11. La stratégie TB(Trunk backward)).

4.2.3.6 La stratégie TF (« Trunk Forward »)

Jusqu'à 50%, les sujets qui adoptent cette stratégie effectuent des mouvements similaires à ceux réalisés par les sujets de la stratégie TB (« Trunk Backward »). La différence entre ces 2 stratégies (TB et TF) est manifeste à 75%. A la différence de la stratégie TB, les sujets pratiquant la stratégie TF penchent le tronc plutôt vers l'intérieur du véhicule lors de leur entrée. Enfin, les sujets s'assoient sur le siège tout en gardant le tronc penché vers l'intérieur du véhicule.

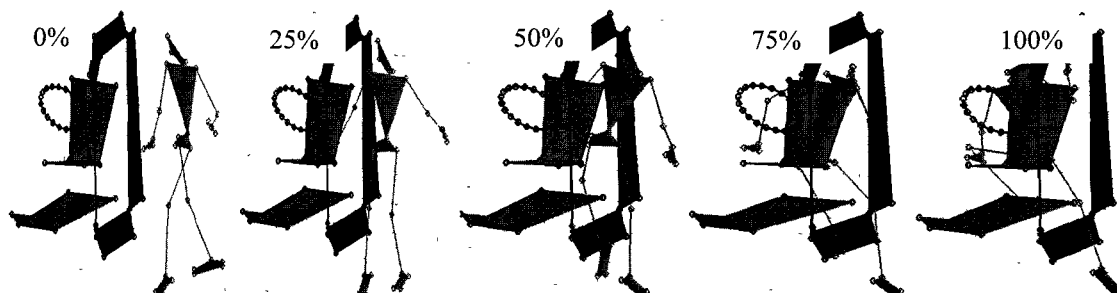


Figure 4 12. La stratégie TF (« Trunk Forward »).

Les stratégies identifiées pour chaque sujet sont données en Annexe A.4.1.

4.2.4 Discussion des résultats

La démarche méthodologique proposée pour quantifier et classifier d'une manière automatique les mouvements d'entrée dans véhicule automobile a été appliquée sur les mouvements d'entrée mesurés sur les deux véhicules retenus dans la présente thèse.

Les résultats issus de la première étape de la démarche ont permis de répartir les sujets en 2 grandes classes : la classe des sujets entrant à « 1 pied » et la classe des sujets entrant à « 2 pieds ». Cette répartition des sujets est conforme aux résultats présentés par Ait El Menceur et al. (Ait El Menceur et al., 2008a). Cependant, cette répartition est réalisée de manière automatique et ne demande aucune expertise.

Les résultats issus de la deuxième étape de la démarche ont permis d'identifier les variables pertinentes des mouvements d'entrée dans les 2 véhicules expérimentés (petit et grand véhicule). Il s'avère que ces variables ne sont pas toutes semblables d'un véhicule à l'autre. C'est le cas de la rotation interne/externe de la hanche droite, de l'abduction/adduction de la cheville gauche et la rotation interne/externe du tronc spécifiques au « petit véhicule », de l'abduction/adduction de la hanche droite, flexion/extension de la cheville droite et l'abduction/adduction de la hanche gauche spécifiques au « grande véhicule ». Il semble donc, probable d'identifier des sous stratégies différentes en fonction des véhicules considérés (cas de la sous stratégie FM spécifique au grand véhicule). Au contraire, d'autres variables articulaires sont montrées discriminantes pour les mouvements d'entrée dans les 2 véhicules. C'est le cas plus particulièrement de la flexion/extension de L5 et des 3 angles de C7 (flexion/extension, abduction/adduction et rotation interne/externe). Ces derniers résultats nous confortent donc dans la décision de considérer le tronc et la tête pour modéliser l'être humain lors de l'étude, voire de la simulation, du mouvement d'entrée dans un véhicule automobile.

Les résultats issus de la deuxième étape de la démarche ont surtout permis de déterminer de manière automatique les sous stratégies du mouvement d'entrée au véhicule automobile. Ainsi, 6 sous stratégies du mouvement d'entrée ont été mises en évidence : la sous stratégie BM (« Backward Motion »), la sous stratégie LS (« Lateral Sliding »), la sous stratégie MM (« Median Motion »), la sous stratégie FM (« Forward Motion »), la sous stratégie TB (« Trunk Backward ») et TF (« Trunk Forward »). Les 4 premières constituent des sous stratégies de la stratégie à « 1 pied ». Les 2 dernières précisent la stratégie à « 2 pieds ». La sous stratégie MM introduite dans cette étude constitue une nouvelle sous stratégie identifiée, qui se situe à la frontière entre la sous stratégie BM, dans laquelle le genou passe complètement à gauche du volant et la sous stratégie LS, dans laquelle le genou passe complètement à droite du volant. L'absence de la sous stratégie MM dans Ait El Menceur et al. (Ait El Menceur et al., 2008a) amène les auteurs à répartir les sujets, classés ici en MM, entre les sous stratégies BM et LS. La sous stratégie MM avait été déjà introduite par Lempereur (Lempereur, 2006) sous le nom : « rotation interne hanche droite- pose pied droit proche du bavolet ». Comme le nom donné par Lempereur (2006) l'indique, les sujets adoptant cette stratégie posent le pied droit au voisinage du milieu du plancher impliquant un rapprochement du genou droit du volant (soit par le côté droit ou bien par la gauche).

La sous stratégie BM figure sur le grand véhicule dans (Ait El Menceur et al., 2008a). Les résultats présentés ont montré au contraire l'infaisabilité de la stratégie BM lors de l'entrée dans le grand véhicule. En effet, cette sous stratégie demande une rotation interne/externe importante de la hanche et cet angle articulaire n'a pas été évalué pertinent sur le grand véhicule.

4.2.5 Conclusion

La démarche proposée a permis de classer de manière automatique les sujets expérimentés en fonction du mouvement d'entrée au véhicule automobile. Cette démarche a permis de retrouver les 2 stratégies et les 5 sous stratégies déjà observées dans Ait El Menceur et al. (Ait El Menceur et al., 2008a) ; Elle a aussi permis d'en isoler une 6^{ème} qui n'avait pas été détectée par l'observation. Cette démarche se révèle donc plus précise. Par ailleurs, elle ne demande aucune expertise et ne souffre donc pas des problèmes liés à la reproductibilité et à la répétabilité inhérent à l'observation. Enfin, la démarche proposée offre l'avantage de classer les sujets en fonction de données quantitatives (des variables articulaires, par ailleurs discriminantes) (Cf. Annexe A.4.2), données qui peuvent être utilisées comme contraintes à l'étape visant la simulation du mouvement.

4.3 RESULTATS DE SIMULATION

4.3.1 Introduction

Cette deuxième partie présente les résultats de simulation. Trois exemples sont traités :

VéhExpérimental (p) → VéhSimulation (p) :

Simulation d'un mouvement d'entrée dans le Véhicule Simulation (avec p = « petit véhicule ») à partir des informations extraites d'un mouvement réalisé sur le Véhicule Expérimental (p = « petit véhicule »).

VéhExpérimental (p) → VéhSimulation(g) à « 1 pied » :

Simulation d'un mouvement d'entrée – à 1 pied – dans le Véhicule Simulation (avec g = « grand véhicule ») à partir des informations extraites du mouvement réalisé (par le même sujet) sur le Véhicule Expérimental (avec p = « petit véhicule »).

VéhExpérimental(p) → VéhSimulation(g) à « 2 pieds » :

Simulation d'un mouvement d'entrée – à 2 pieds – dans le Véhicule Simulation (avec g = « grand véhicule ») à partir des informations extraites du mouvement réalisé (par le même sujet) sur le Véhicule Expérimental (avec p = « petit véhicule »).

Pour les 2 derniers exemples, la stratégie d'entrée adoptée par le sujet lors des expérimentations dans le Véhicule Simulation était identique à celle adoptée sur le Véhicule Expérimental.

Un dernier exemple simule sur le Véhicule Simulation la stratégie d'entrée adoptée par un sujet sur le Véhicule Expérimental, mais qui n'avait pas été retenue par ce sujet lors des expérimentations sur le Véhicule Simulation (*VéhExpérimental(p) → VéhSimulation(g)*).

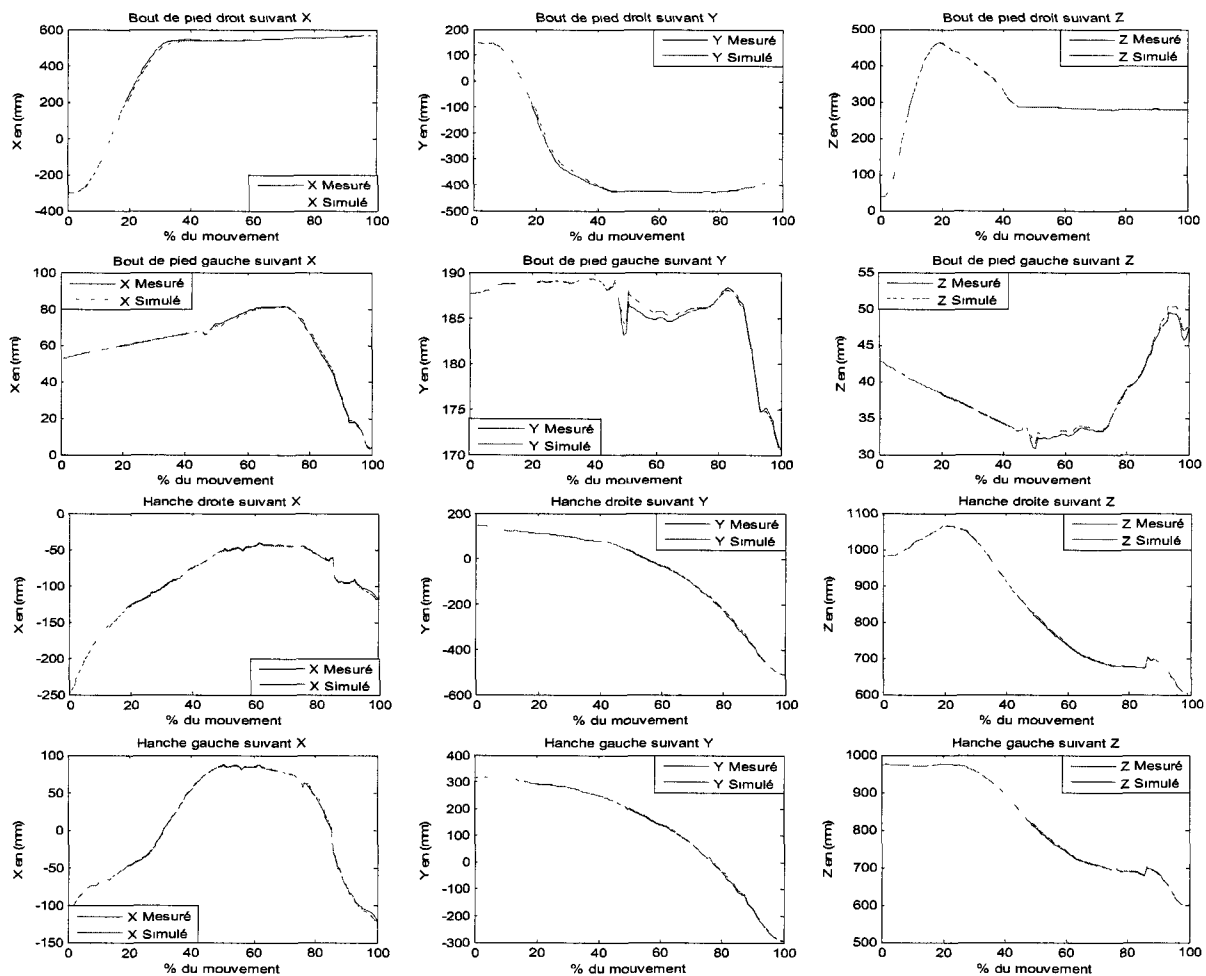
Enfin, une dernière partie traite de la robustesse du simulateur.

4.3.2 Simulation VéhExpérimental(p) → VéhSimulation(p)

Cet exemple vise à valider la pertinence de notre démarche méthodologique de simulation. L'objectif est de simuler le mouvement d'entrée dans le Véhicule Simulation (ici le « petit véhicule ») à partir des informations extraites d'un mouvement réalisé sur le Véhicule Expérimental (ici aussi « le petit véhicule »). L'exemple concerne un sujet âgé de 75 ans, mesurant 1.95m, pesant 90kg, muni d'une prothèse de hanche droite et ayant adopté la sous stratégie LS (« Lateral Sliding »), sur le « petit véhicule »

4.3.2.1 Simulation des trajectoires des points « caractéristiques » sur le Véhicule Simulation

Les trajectoires des points « caractéristiques » simulées sur le Véhicule Simulation sont le résultat de l'adaptation opérée sur les trajectoires des points caractéristiques extraites du mouvement réalisé par le sujet retenu sur le Véhicule Expérimental (Cf. §2.6.1.3). La figure 4.13 présente les trajectoires de ces points « caractéristiques » mesurées sur le Véhicule Expérimental et simulées sur le Véhicule Simulation (ici en l'occurrence aussi le « petit véhicule ») exprimées dans le repère lié au laboratoire.



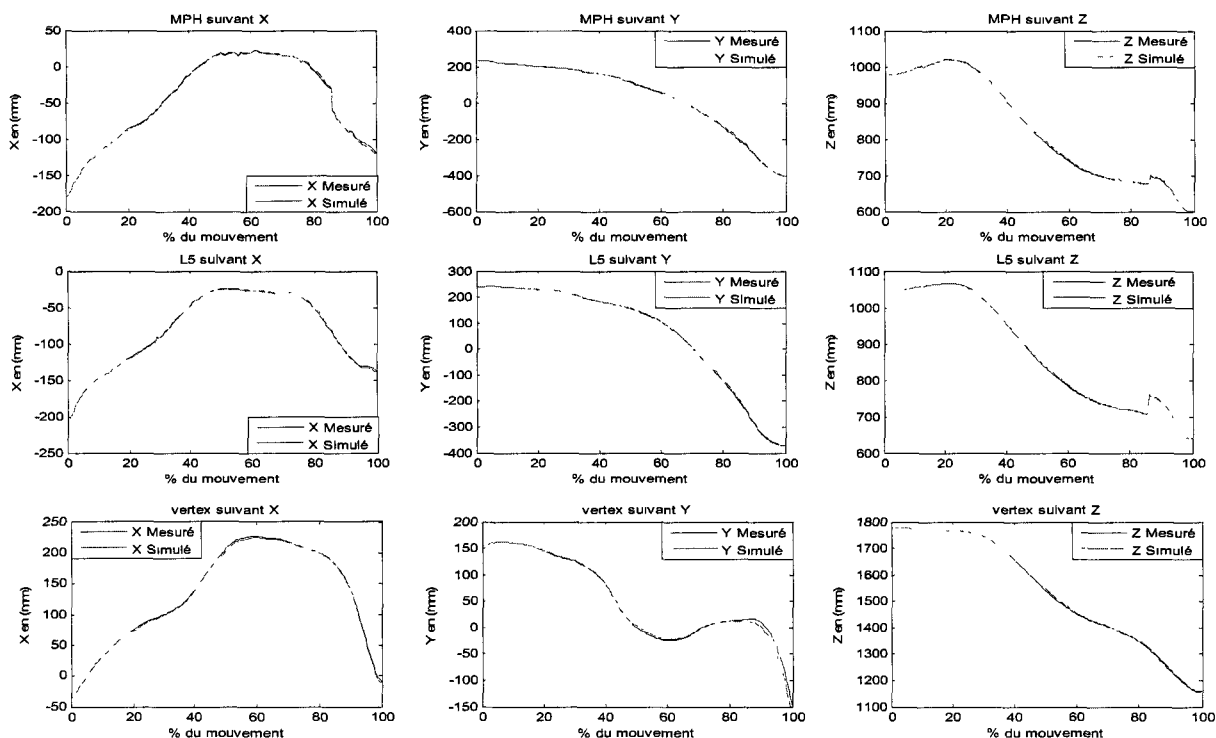


Figure 4 13. Trajectoires mesurées et simulées des points caractéristiques pour le sujet 12 réalisant la sous stratégie LS sur le « petit véhicule » exprimées dans le repère lié au laboratoire.

Le tableau 4.7 donne les coefficients de corrélation et les RMS Normalisées calculés entre les trajectoires mesurées sur le Véhicule Expérimental (le « petit véhicule ») et simulées sur le Véhicule Simulation (le « petit véhicule » aussi) des points caractéristiques.

	X		Y		Z	
	R	RMSN	R	RMSN	R	RMSN
Bout pied droit	0.999	0.008	0.999	0.011	1	0.001
Bout pied gauche	0.999	0.009	0.997	0.023	0.999	0.022
MPH	0.999	0.006	1	0.005	1	0.004
Hanche droite	0.999	0.006	1	0.005	1	0.004
Hanche gauche	0.999	0.007	1	0.005	1	0.005
L5	0.999	0.006	1	0.004	1	0.004
Vertex	0.999	0.006	0.999	0.015	1	0.005

Tableau 4 7. Coefficients de corrélation et RMS Normalisées calculées entre les trajectoires mesurées et simulées sur le « petit véhicule » des points caractéristiques pour le sujet 12 réalisant la sous stratégie LS.

Quelque soit le point caractéristique considéré, le coefficient de corrélation est supérieur à 0.99 et la RMSN est inférieure à 2 % (Cf. tableau 4.7). Ce résultat confirme la pertinence, dans ce cas, de la technique d’adaptation des trajectoires proposée par Zhang et al. (2002) pour notre application.

4.3.2.2 Simulation des angles articulaires et de l'orientation spatiale du bassin sur le Véhicule Simulation

Les angles articulaires et l'orientation spatiale du bassin sont calculés tels que les points « caractéristiques » attachés à l'humanoïde de synthèse suivent « au plus près » les trajectoires des points « caractéristiques » simulés précédemment. La figure 4.14 présente les angles articulaires et l'orientation spatiale du bassin adaptés et simulés sur le Véhicule Simulation (le « petit véhicule »).

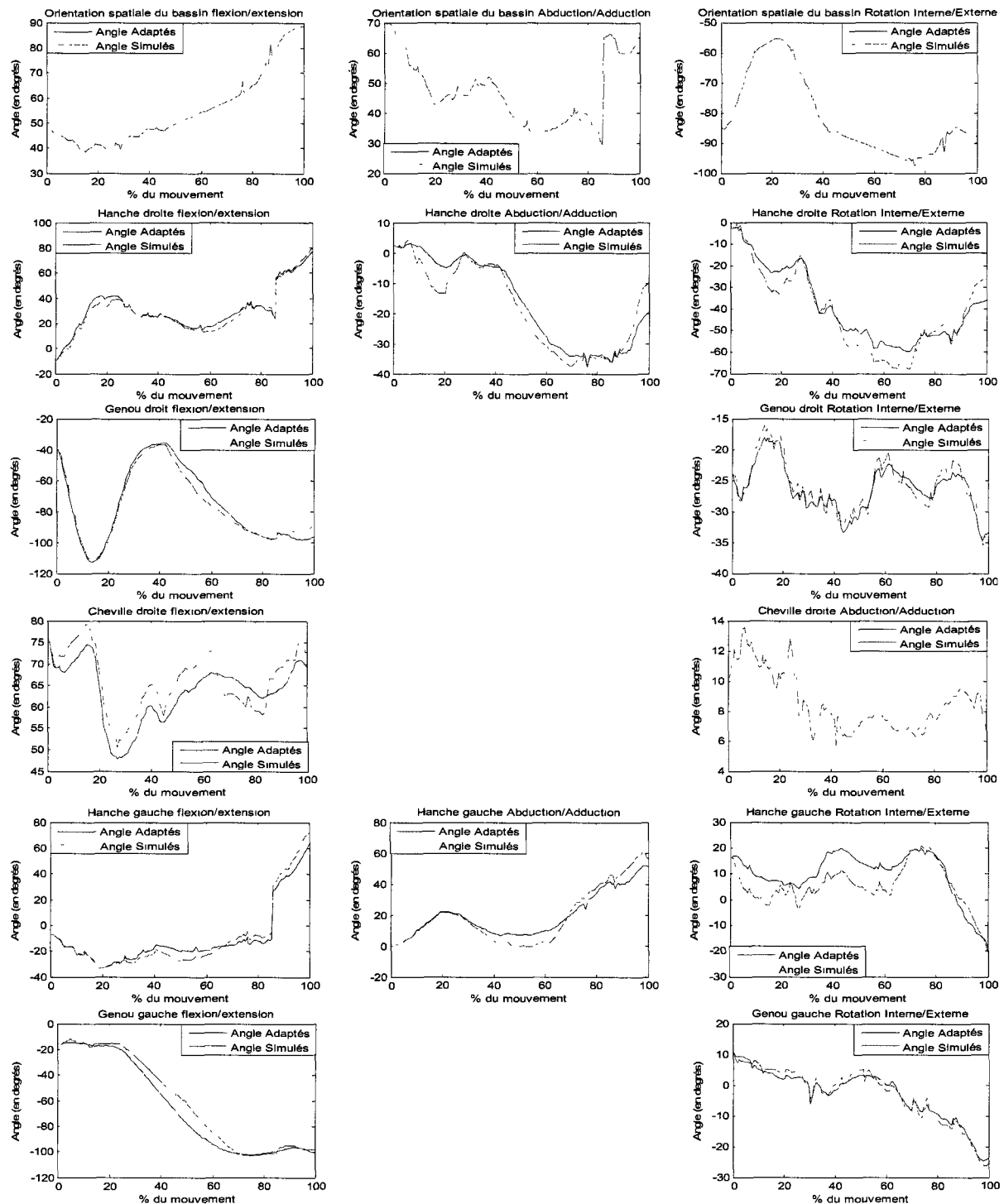


Figure 4 14. *Orientation spatiale du bassin et angles articulaires adaptés sur le « petit véhicule » (Véhicule Expérimental) et simulés sur le « petit véhicule » (Véhicule Simulation) pour le sujet 12 réalisant la sous stratégie LS.*

Le tableau 4.8 présente les coefficients de corrélation et les RMS Normalisées calculés entre les angles articulaires et l'orientation spatiale du bassin adaptés et simulés.

	Flexion/Extension		Abduction/adduction		Rotation Interne/Externe	
	R	RMSN	R	RMSN	r	RMSN
Bassin	1	0	1	0	1	0
Cheville droite	0.943	0.167	1	0	-	-
Genou droit	0.995	0.052	-	-	0.979	0.072
Hanche droite	0.996	0.031	0.982	0.099	0.981	0.085
Cheville gauche	0.930	0.161	0.989	0.057	-	-
Genou gauche	0.995	0.076	-	-	0.994	0.039
Hanche gauche	0.996	0.046	0.995	0.091	0.929	0.158
L5	0.978	0.073	1	0	1	0
C7	0.971	0.142	1	0	1	0

Tableau 4 8. *Coefficients de corrélation et RMS Normalisées calculés entre les angles articulaires et l'orientation spatiale du bassin adaptés et simulés pour le sujet 12 réalisant la sous stratégie LS.*

Quelque soit l'articulation considérée, le coefficient de corrélation est supérieur à 0.92 (Cf. tableau 4.8). Pour l'angle de flexion/ extension de la cheville droite, pour l'angle de flexion/ extension de la cheville gauche et pour l'angle de rotation interne/ externe de la hanche gauche, la RMSN est supérieure à 15%. Pour tous les autres angles, la RMSN est inférieure à 15%. Les angles articulaires et l'orientation spatiale du bassin simulés sont donc relativement conformes aux angles adaptés et mémorisés dans la base de mouvements. Notons que les coefficients de corrélation et la RMSN sont égales à 1 et 0 pour le bassin.

Par conséquent, la simulation des angles articulaires et de l'orientation spatiale du bassin est très satisfaisante, voire parfaite (le bassin). Ce résultat était prévisible car le mouvement d'entrée a été simulé dans le « petit véhicule » à partir du mouvement d'entrée adapté réalisé dans le même « petit véhicule ». Les différences observées entre le mouvement simulé et adapté résultent des approximations inhérentes à la simulation des trajectoires des bouts de pieds, des chevilles, des genoux, de L5, de C7 et du vertex et du calcul des angles articulaires.

La figure 4.15 présente en quelques images (une chaque 10%) le mouvement simulé et le mouvement adapté.

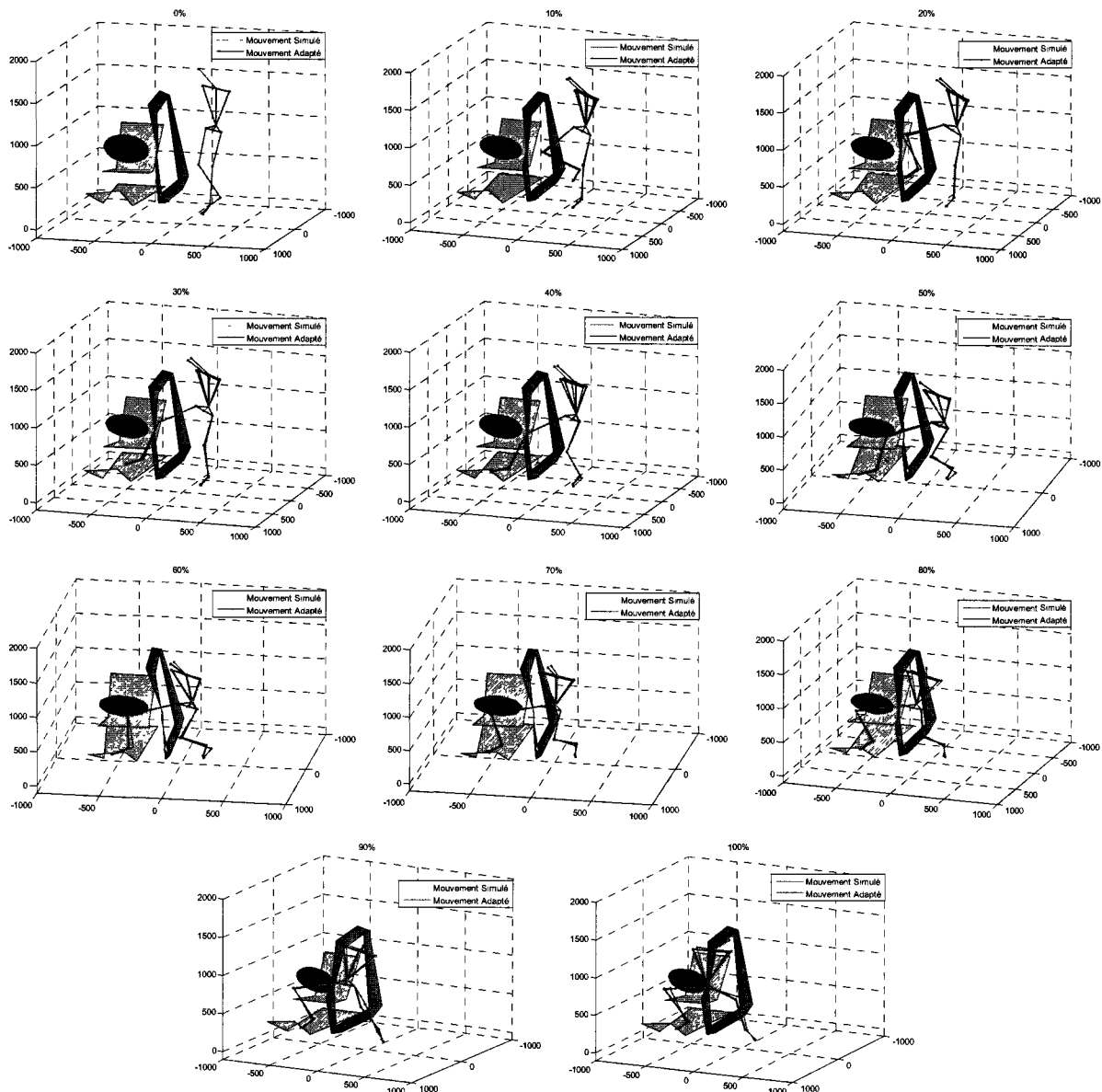


Figure 4 15. Postures simulées et postures mesurées sur le « petit véhicule » pour le sujet 12 réalisant la sous stratégie LS (cas où le Véhicule Simulation est le Véhicule Expérimental).

4.3.2.3 Etude de la sous stratégie du mouvement simulé

Ce paragraphe vise à vérifier l'appartenance du mouvement simulé à la sous stratégie retenue pour la simulation sur le Véhicule Simulation (et inhérente au choix du sujet). Dans le cas présent le Véhicule Simulation est identique au Véhicule Expérimental.

- *Détermination des représentants pour chaque sous stratégie d'entrée*

Dans un premier temps les caractéristiques des sujets représentants fictifs pour chaque sous stratégie sont déterminées. Le tableau 4.9 donne un extrait des caractéristiques des sujets représentants fictifs des sous stratégies d'entrée identifiées sur le Véhicule Simulation (le « petit véhicule »). Les valeurs des angles articulaires et de l'orientation du bassin sont prises

sur 50 fenêtres temporelles (Cf. §3.3.9, Chapitre 3) et sont centrées et réduites sur l'intervalle [0,1].

	Fenêtre temporelle 1							...	Fenêtre temporelle 50						
	Bassin F/E	Bassin Ab/Ad	Bassin Rotl/E	...	C7 F/E	C7 Ab/Ad	C7 Rotl/E		Bassin F/E	Bassin Ab/Ad	Bassin Rotl/E	...	C7 F/E	C7 Ab/Ad	C7 Rotl/E
LS	0.77	0.68	0.32	...	0.38	0.48	0.48	...	0.65	0.63	0.36	...	0.36	0.45	0.46
MM	0.71	0.65	0.35	...	0.42	0.47	0.50	...	0.76	0.68	0.30	...	0.42	0.47	0.52
TB	0.80	0.59	0.26	...	0.40	0.47	0.50	...	0.84	0.64	0.29	...	0.35	0.48	0.49
TF	0.68	0.70	0.41	...	0.45	0.53	0.51	...	0.47	0.67	0.61	...	0.35	0.48	0.48
BM	0.75	0.68	0.31	...	0.37	0.48	0.47	...	0.81	0.64	0.27	...	0.45	0.51	0.46

Tableau 4 9. *Caractéristiques angulaires des sujets représentant fictifs des stratégies d'entrée identifiées sur « le petit véhicule ».*

Puis, les sujets « réels » représentant chaque sous stratégie sont déterminés. Le tableau 4.10 présente les distances entre les sujets réels réalisant la stratégie LS et le sujet fictif représentant la stratégie LS. Le sujet réel représentant la sous stratégie est le sujet dont la distance par rapport au sujet fictif représentant la stratégie est la plus petite. Par conséquent, le sujet 12 est le sujet réel le mieux placé pour représenter la sous stratégie LS. L'annexe A.4.3 présente ce même tableau pour les autres sous stratégies.

	Sujets de la stratégie LS sur le petit véhicule				
	Sujet 10	Sujet 12	Sujet 26	Sujet 31	Sujet 34
Distance	3.28	1.64	1.82	1.82	1.65

Tableau 4 10. *Distances calculées entre les caractéristiques angulaires des sujets réels réalisant la sous stratégie LS et celles du sujet fictif représentant la stratégie LS sur le « petit véhicule ».*

- *La sous stratégie du mouvement simulé*

Le tableau 4.11 donne un extrait des caractéristiques des sujets réels représentant « au mieux » les sous stratégies d'entrée identifiées sur le Véhicule Simulation (ici « le petit véhicule »). Les angles articulaires et l'orientation spatiale du bassin sont centrés et réduits sur l'intervalle [0,1].

	Fenêtre temporelle 1							...	Fenêtre temporelle 50						
	Bassin F/E	Bassin Ab/Ad	Bassin Rotl/E	...	C7 F/E	C7 Ab/Ad	C7 Rotl/E		Bassin F/E	Bassin Ab/Ad	Bassin Rotl/E	...	C7 F/E	C7 Ab/Ad	C7 Rotl/E
LS	0.80	0.68	0.26	...	0.39	0.42	0.51	...	0.75	0.67	0.26	...	0.38	0.45	0.44
MM	0.75	0.50	0.47	...	0.43	0.51	0.48	...	0.84	0.69	0.23	...	0.43	0.47	0.48
TB	0.78	0.51	0.28	...	0.44	0.45	0.56	...	0.90	0.58	0.30	...	0.32	0.45	0.49
TF	0.64	0.74	0.50	...	0.48	0.52	0.48	...	0.38	0.73	0.75	...	0.29	0.48	0.47
BM	0.87	0.62	0.22	...	0.41	0.44	0.46	...	0.83	0.54	0.26	...	0.42	0.47	0.51

Tableau 4 11. *Caractéristiques angulaires des sujets réels représentant « au mieux » les sous stratégies d'entrée identifiées sur le « petit véhicule ».*

Le tableau 4.12 présente les distances calculées entre les caractéristiques angulaires du mouvement simulé sur le Véhicule Simulation et celles des mouvements des sujets réels représentant les sous stratégies d'entrée.

Distance	Sujets représentants des stratégies sur le « petit véhicule »				
	LS (S12)	MM (S41)	TB (S16)	TF (S37)	BM (S04)
	2.60	4.45	4.38	4.68	3.73

Tableau 4 12. Distances calculées entre les caractéristiques angulaires du mouvement simulé et celles des sujets réels représentant les sous stratégies identifiées sur le « petit véhicule ».

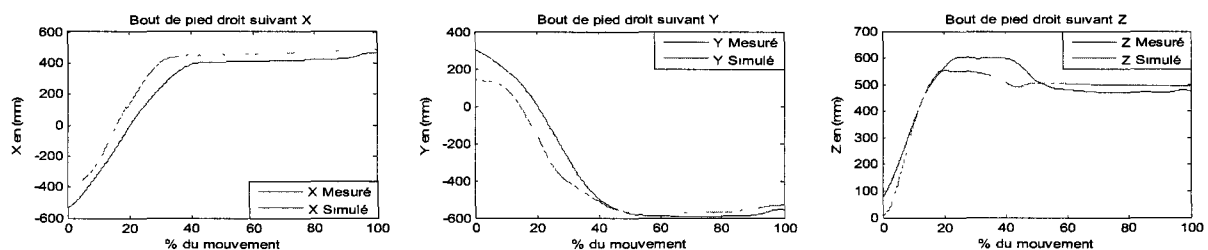
Le tableau 4.12 montre que cette distance est minimale (2.60) pour la sous stratégie LS. Le mouvement simulé relève donc bien de la stratégie LS, stratégie adoptée par le sujet sur le Véhicule Expérimental, et ici Simulation également.

4.3.3 Simulation VéhExpérimental (p) → VéhSimulation(g) à « 1 pied »

L'objectif est de simuler le mouvement d'entrée – à 1 pied – dans le Véhicule Simulation (ici le « grand véhicule ») à partir des informations extraites d'un mouvement réalisé sur le Véhicule Expérimental (ici « le petit véhicule »). L'exemple traité concerne un sujet âgé de 75 ans, mesurant 1.95m, pesant 90kg, muni d'une prothèse de hanche droite et ayant adopté la sous stratégie LS (« Lateral Sliding »), sur le « petit véhicule » et sur « le grand véhicule ». Nous renvoyons le lecteur à l'annexe A.4.3 pour la simulation inverse (VéhExpérimental (g) → VéhSimulation(p) à « 1 pied »).

4.3.3.1 Simulation des trajectoires des points caractéristiques sur le Véhicule Simulation

Les trajectoires des points « caractéristiques » obtenues sur le Véhicule Simulation sont le résultat de l'adaptation opérée sur les trajectoires des points caractéristiques extraites du mouvement réalisé sur le Véhicule Expérimental (Cf. §2.6.1.3). La figure 4.16 présente les trajectoires des points « caractéristiques » mesurées et simulées sur le Véhicule Simulation (le « grand véhicule ») exprimées dans le repère lié au laboratoire.



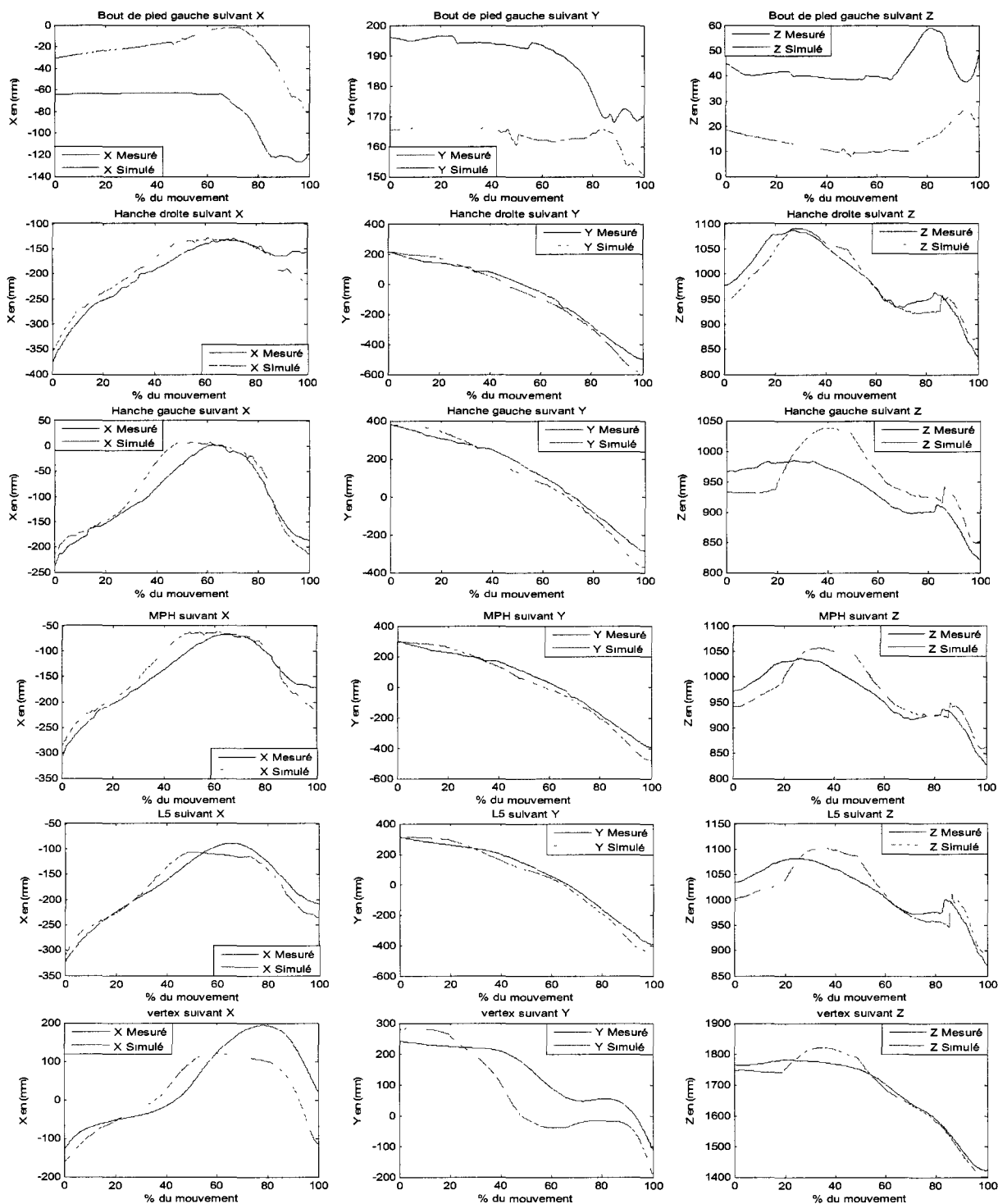


Figure 4.16. Trajectoires des points caractéristiques mesurées et simulées sur le « grand véhicule » pour le sujet 12 réalisant la sous stratégie LS exprimées dans le repère lié au laboratoire.

Le tableau 4.13 donne les coefficients de corrélation et les RMS Normalisées calculés entre les trajectoires des points caractéristiques mesurées et simulées sur le « grand véhicule ».

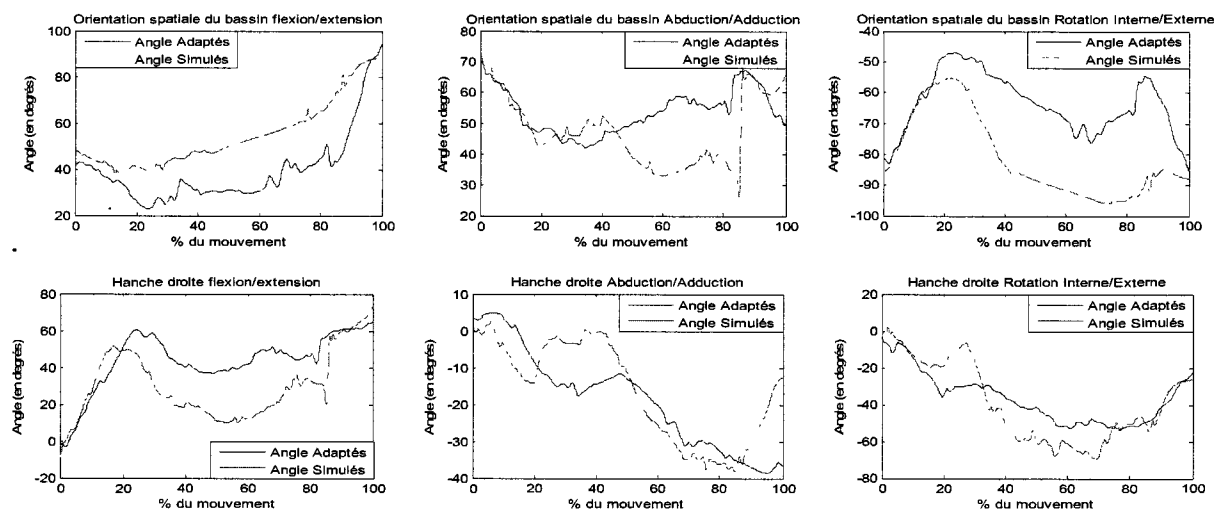
	X		Y		Z	
	r	RMSN	R	RMSN	R	RMSN
Bout pied droit	0.996	0.103	0.995	0.095	0.967	0.072
Bout pied gauche	0.854	0.591	0.815	0.562	0.592	0.584
MPH	0.978	0.099	0.998	0.052	0.938	0.158
Hanche droite	0.971	0.097	0.998	0.050	0.976	0.094
Hanche gauche	0.984	0.113	0.998	0.053	0.849	0.310
L5	0.979	0.081	0.998	0.046	0.933	0.154
Vertex	0.903	0.182	0.944	0.210	0.991	0.066

Tableau 4 13. Coefficients de corrélation et RMS Normalisées calculées entre les trajectoires mesurées et simulées des points caractéristiques sur le « grand véhicule » pour le sujet 12 réalisant la sous stratégie LS.

Le tableau 4.13 fait apparaître de bonnes corrélations pour le bout du pied droit, MPH, la hanche droite et MPH. Au contraire, pour les trajectoires du bout du pied gauche et la hanche gauche, les résultats sont relativement moins bons. Les hypothèses, mais aussi la variabilité au sein d'une même stratégie, donc aussi intra individuelle, peut expliquer en partie de tels résultats. Nous revenons plus amplement sur les possibles causes des différences observées en perspectives (Cf. Chapitre 5).

4.3.3.2 Simulation des angles articulaires et de l'orientation du bassin sur le Véhicule Simulation

Les angles articulaires et l'orientation spatiale du bassin sont calculés tels que les points « caractéristiques » attachés à l'humanoïde suivent « au plus près » les trajectoires des points caractéristiques précédemment simulés. La figure 4.17 présente les angles articulaires et l'orientation spatiale du bassin adaptés et simulés sur le « grand véhicule ».



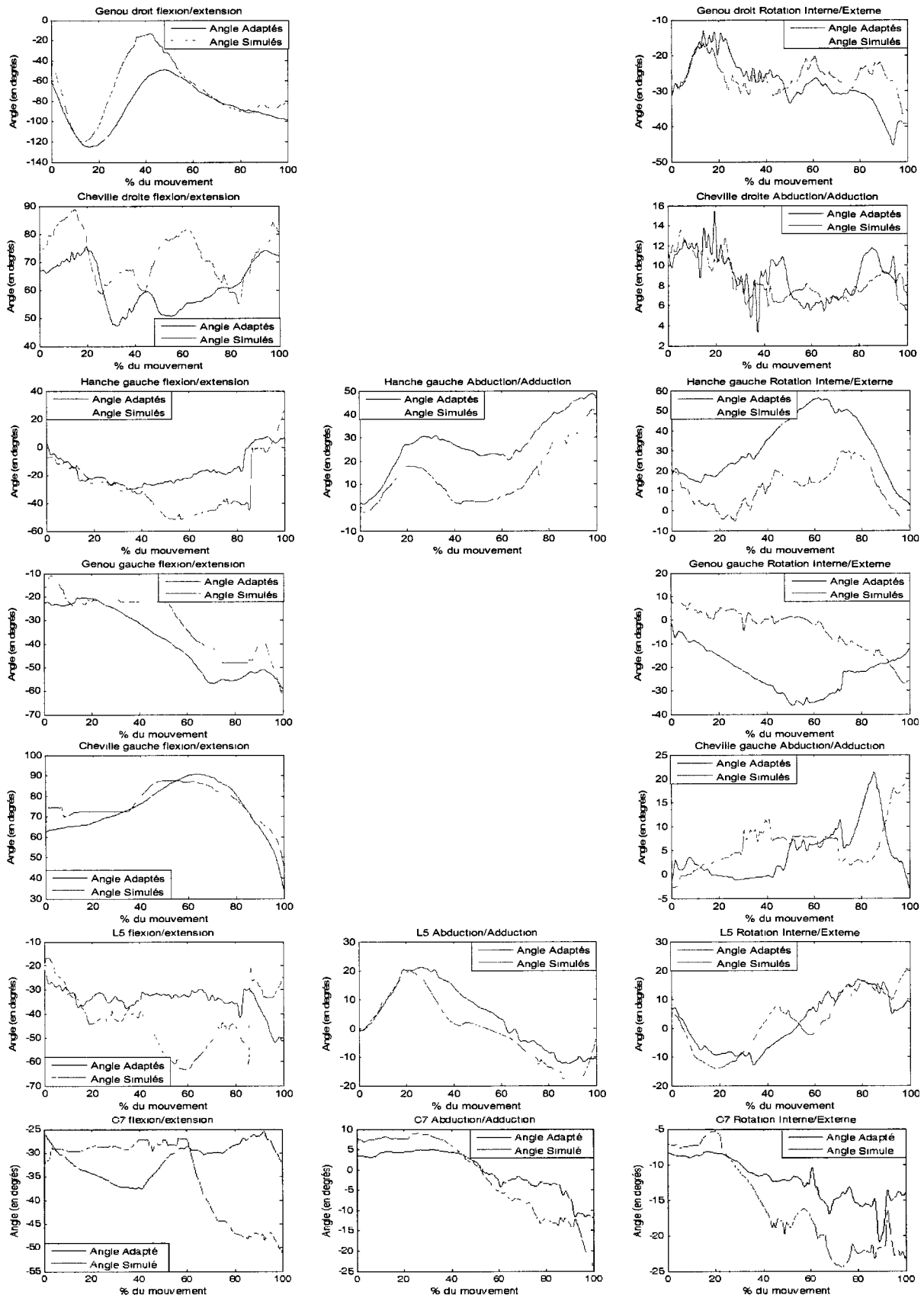


Figure 4.17. Orientation spatiale du bassin et angles articulaires adaptés et simulés sur le Véhicule Simulation (le « grand véhicule ») pour le sujet 12 réalisant la sous stratégie LS.

Le tableau 4.14 présente les coefficients de corrélation et les RMS Normalisées calculés entre les angles articulaires et l'orientation spatiale du bassin adaptés et simulés sur le « grand véhicule ».

	Flexion/Extension		Abduction/adduction		Rotation Interne/Externe	
	r	RMSN	R	RMSN	R	RMSN
Bassin	0.936	0.308			0.815	0.404
Cheville droit			0.818	0.192	-	-
Genou droit	0.907	0.321	-	-	0.730	0.274
Hanche droite	0.832	0.259	0.886	0.216	0.938	0.179
Cheville gauche	0.975	0.115			-	-
Genou gauche	0.961	0.224	-	-		
Hanche gauche	0.855	0.300	0.932	0.301	0.872	0.356
L5			0.969	0.148	0.901	0.198
C7			0.981	0.176	0.950	0.320

Tableau 4 14. Coefficients de corrélation et RMS Normalisées calculés entre les angles articulaires et l'orientation spatiale du bassin adaptés et simulés sur le « grand véhicule » pour le sujet 12 réalisant la sous stratégie LS.

Les résultats obtenus peuvent être classés en 3 catégories, les résultats relativement bons (représentés en vert, pour $r \geq 0.80$ et $NRMS \leq 0.30$), relativement moyens (représentés en jaune, pour $r \geq 0.80$ ou $NRMS \leq 0.30$) et plutôt « mauvais » (représentés en rouge, pour $r < 0.80$ et $NRMS > 0.30$).

- Les résultats relativement bons regroupent : la flexion/extension, l'abduction/adduction et la rotation interne/externe de la hanche droite, l'abduction/adduction de la cheville droite, l'abduction/adduction et la rotation interne/externe en L5, la flexion/extension de la hanche gauche, la flexion/extension du genou gauche, la flexion/extension de la cheville gauche, l'abduction/adduction en C7.

- Les résultats relativement moyens regroupent : la flexion/extension et la rotation interne/externe du genou droit, la flexion/extension du bassin, l'abduction/adduction et la rotation interne/externe de la hanche gauche, la rotation interne/externe en C7 et l'abduction/adduction du bassin.

- Les résultats plutôt « mauvais » regroupent : la flexion/extension de la cheville droite, la flexion/extension en L5, la rotation interne/externe du bassin, la rotation interne/externe du genou gauche, l'abduction/adduction de la cheville gauche et la flexion/extension en C7.

Ces résultats montrent globalement que 1) le bassin est plutôt mal orienté dans l'espace, 2) la flexion/extension de L5 n'est pas satisfaisante et que les résultats se dégradent plus on se rapproche des pieds.

La figure 4.18 présente en quelques images (une chaque 10%) le mouvement simulé et le mouvement mesuré sur le « grand véhicule » pour la sous stratégie LS. Malgré les

différences relevées entre les angles articulaires et l'orientation spatiale du bassin adaptés et simulés, ces représentations font apparaître des ressemblances entre les mouvements mesurés et simulés.

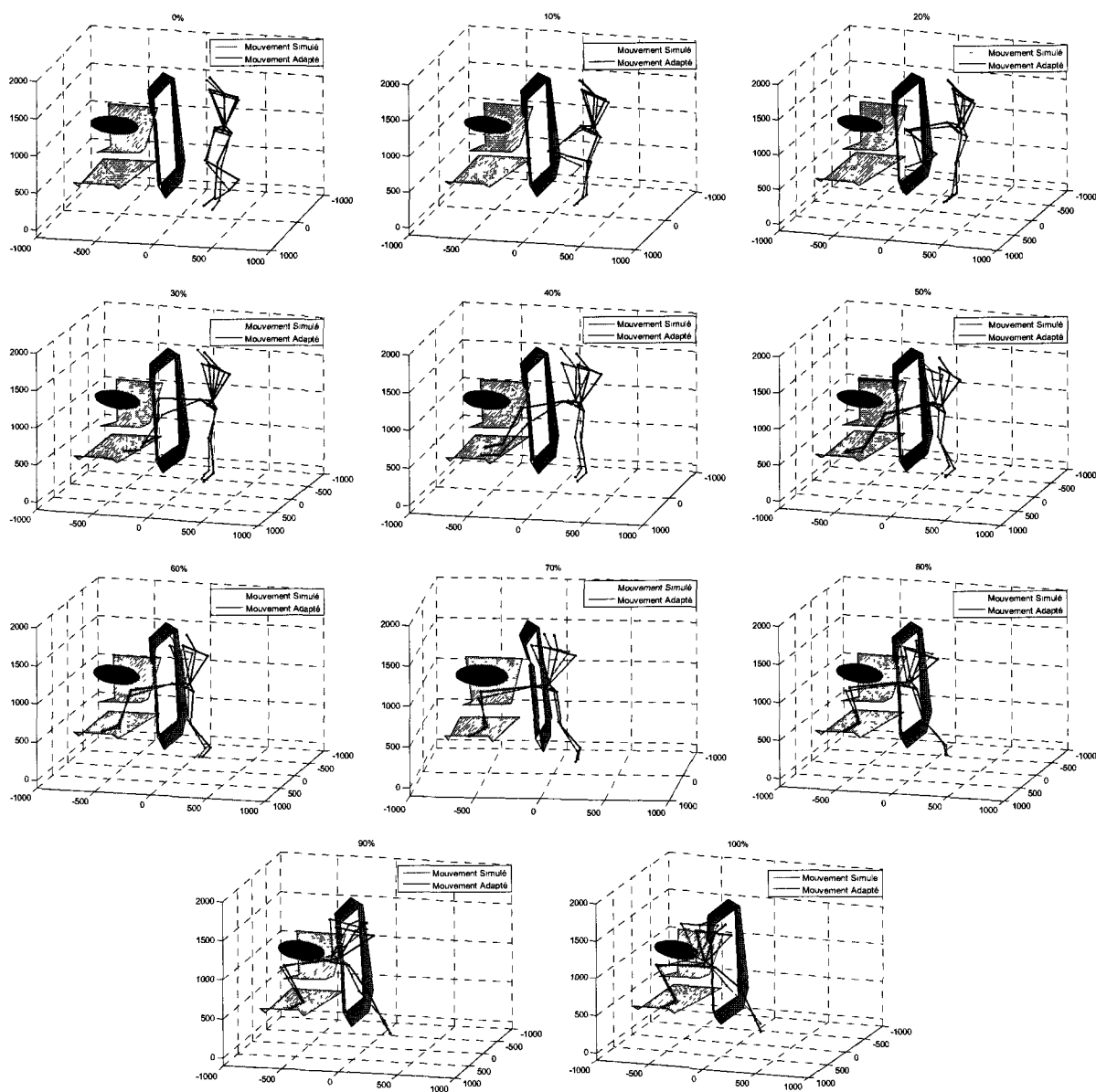


Figure 4 18. Postures simulées et postures mesurées sur le « grand véhicule » pour le sujet 12 réalisant la sous stratégie LS.

4.3.3.3 Etude de la sous stratégie du mouvement simulé

Cette partie vise à vérifier l'appartenance du mouvement simulé à la sous stratégie retenue pour la simulation sur le Véhicule Simulation.

- Détermination des représentants pour chaque sous stratégie d'entrée

Dans un premier temps les caractéristiques des sujets fictifs représentant chaque sous stratégie d'entrée identifiée sur le Véhicule Simulation (le « grand véhicule ») sont

déterminées. Le tableau 4.15 donne un extrait des caractéristiques des sujets fictifs des stratégies d'entrée identifiées sur le Véhicule Simulation. Les angles articulaires et l'orientation spatiale du bassin sont centrés et réduits sur l'intervalle [0,1].

	Fenêtre temporelle 1								...	Fenêtre temporelle 50							
	Bassin F/E	Bassin Ab/Ad	Bassin Rotl/E	...	C7 F/E	C7 Ab/Ad	C7 Rotl/E	...		Bassin F/E	Bassin Ab/Ad	Bassin Rotl/E	...	C7 F/E	C7 Ab/Ad	C7 Rotl/E	
LS	0.68	0.66	0.37	...	0.39	0.47	0.49	...	0.68	0.68	0.32	...	0.37	0.43	0.47		
MM	0.58	0.70	0.40	...	0.45	0.51	0.47	...	0.64	0.69	0.37	...	0.40	0.46	0.48		
TB	0.63	0.67	0.43	...	0.38	0.48	0.45	...	0.75	0.66	0.38	...	0.34	0.49	0.45		
TF	0.83	0.65	0.24	...	0.39	0.44	0.49	...	0.38	0.67	0.69	...	0.30	0.45	0.44		
FM	0.61	0.69	0.42	...	0.39	0.47	0.46	...	0.67	0.69	0.32	...	0.46	0.46	0.49		

Tableau 4 15. *Caractéristiques angulaires des sujets fictifs représentant les sous stratégies d'entrée identifiées sur le « grand véhicule ».*

Puis, les sujets « réels » représentant chaque sous stratégie sur le Véhicule Simulation sont déterminés. Le tableau 4.16 présente les distances entre les sujets réels réalisant la stratégie LS et le sujet fictif représentant la stratégie LS sur le Véhicule Simulation (le « grand véhicule »). Au regard des valeurs obtenues, le sujet 34 est le sujet réel le mieux placé pour représenter la sous stratégie LS sur le « grand véhicule ». L'annexe A.4.3 présente ce même tableau pour les autres sous stratégies.

	Sujets de la stratégie LS sur le « grand véhicule »					
	S 05	S 10	S 12	S 26	S 31	S 34
Distance	1.93	1.85	1.83	2.22	1.59	1.21

Tableau 4 16. *Distances calculées entre les caractéristiques angulaires des sujets réels réalisant la stratégie LS et celles du sujet fictif représentant « au mieux » la stratégie LS sur le « grand véhicule ».*

- *La sous stratégie du mouvement simulé*

Le tableau 4.17 donne un extrait des caractéristiques des sujets réels représentant « au mieux » les stratégies d'entrée identifiées sur le Véhicule Simulation (« le grand véhicule »). Les angles articulaires et l'orientation spatiale du bassin sont centrés et réduits sur l'intervalle [0,1].

	Fenêtre temporelle 1								...	Fenêtre temporelle 50							
	Bassin F/E	Bassin Ab/Ad	Bassin Rotl/E	...	C7 F/E	C7 Ab/Ad	C7 Rotl/E	...		Bassin F/E	Bassin Ab/Ad	Bassin Rotl/E	...	C7 F/E	C7 Ab/Ad	C7 Rotl/E	
LS	0.42	0.74	0.50	...	0.44	0.53	0.42	...	0.51	0.70	0.50	...	0.38	0.47	0.44		
MM	0.32	0.72	0.56	...	0.43	0.51	0.49	...	0.72	0.68	0.28	...	0.41	0.55	0.38		
TB	0.61	0.72	0.32	...	0.44	0.53	0.42	...	0.86	0.62	0.29	...	0.38	0.44	0.47		
TF	0.61	0.63	0.25	...	0.47	0.54	0.46	...	0.29	0.72	0.84	...	0.23	0.50	0.42		
FM	0.02	0.73	0.86	...	0.49	0.51	0.43	...	0.60	0.74	0.34	...	0.65	0.55	0.28		

Tableau 4 17. *Caractéristiques angulaires des sujets réels des différentes stratégies d'entrée identifiées sur le « grand véhicule ».*

Le tableau 4.18 présente les distances entre le mouvement simulé et les mouvements des sujets représentant les sous stratégies d'entrée sur le Véhicule Simulation.

	Représentants des différentes stratégies sur le « grand véhicule »				
	LS (S34)	MM (S20)	TB (S30)	TF (S37)	FM (S03)
Distance	4.37	5.21	5.02	5.40	5.45

Tableau 4 18. Distances calculées entre les caractéristiques angulaires du mouvement simulé et celles des sujets réels représentant des sous stratégies identifiées sur le « grand véhicule ».

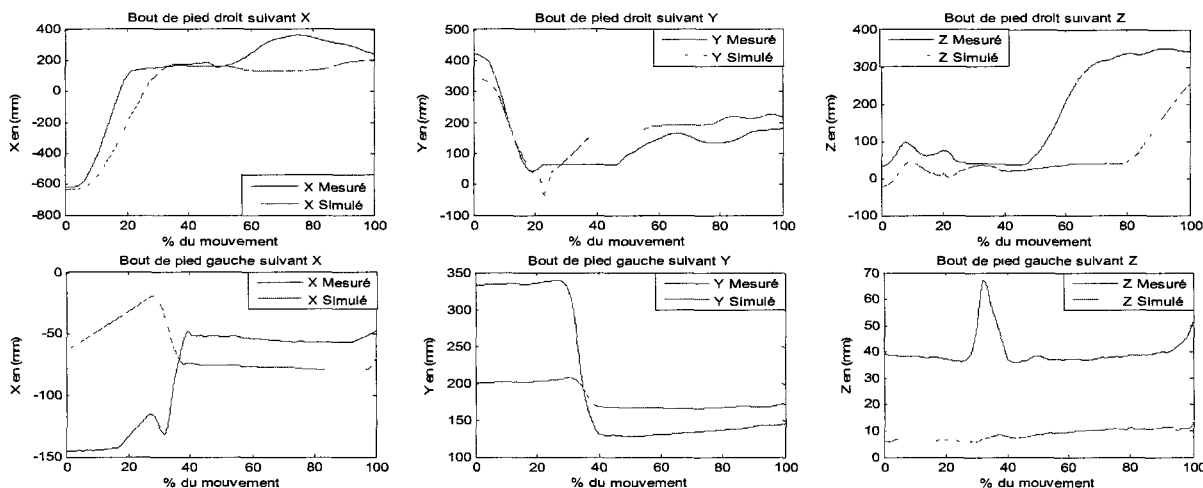
Le tableau 4.18 montre que cette distance est minimale (4.37) pour la sous stratégie LS. Le mouvement simulé relève donc bien de la stratégie LS, stratégie adoptée par le sujet sur le Véhicule Expérimental et simulé ici sur le Véhicule Simulation.

4.3.4 Simulation VéhExpérimental(p) → VéhiCible(g) à « 2 pieds »

L'objectif est de simuler le mouvement d'entrée dans le Véhicule Simulation (ici le « grand véhicule ») à partir des informations extraites d'un mouvement réalisé sur le Véhicule Expérimental (ici « le petit véhicule »). L'exemple traité concerne un sujet âgé de 52 ans, mesurant 1.72 m, pesant 64.4 kg, muni d'une prothèse de hanche droite et ayant adopté la sous stratégie TB (« Trunk Backward ») sur le « petit véhicule ». Nous renvoyons le lecteur à l'annexe A.4.3 pour la simulation inverse (VéhExpérimental (g) → VéhSimulation(p) à « 2 pieds »).

4.3.4.1 Simulation des trajectoires des points caractéristiques sur le Véhicule Simulation

Les trajectoires des points « caractéristiques » obtenues sur le Véhicule Simulation sont le résultat de l'adaptation opérée sur les trajectoires des points extraits du mouvement réalisé sur le Véhicule Expérimental (Cf. §2.6.1.3). La figure 4.19 présente les trajectoires des points « caractéristiques » mesurées et simulées sur le Véhicule Simulation (le « grand véhicule ») exprimées dans le repère lié au laboratoire.



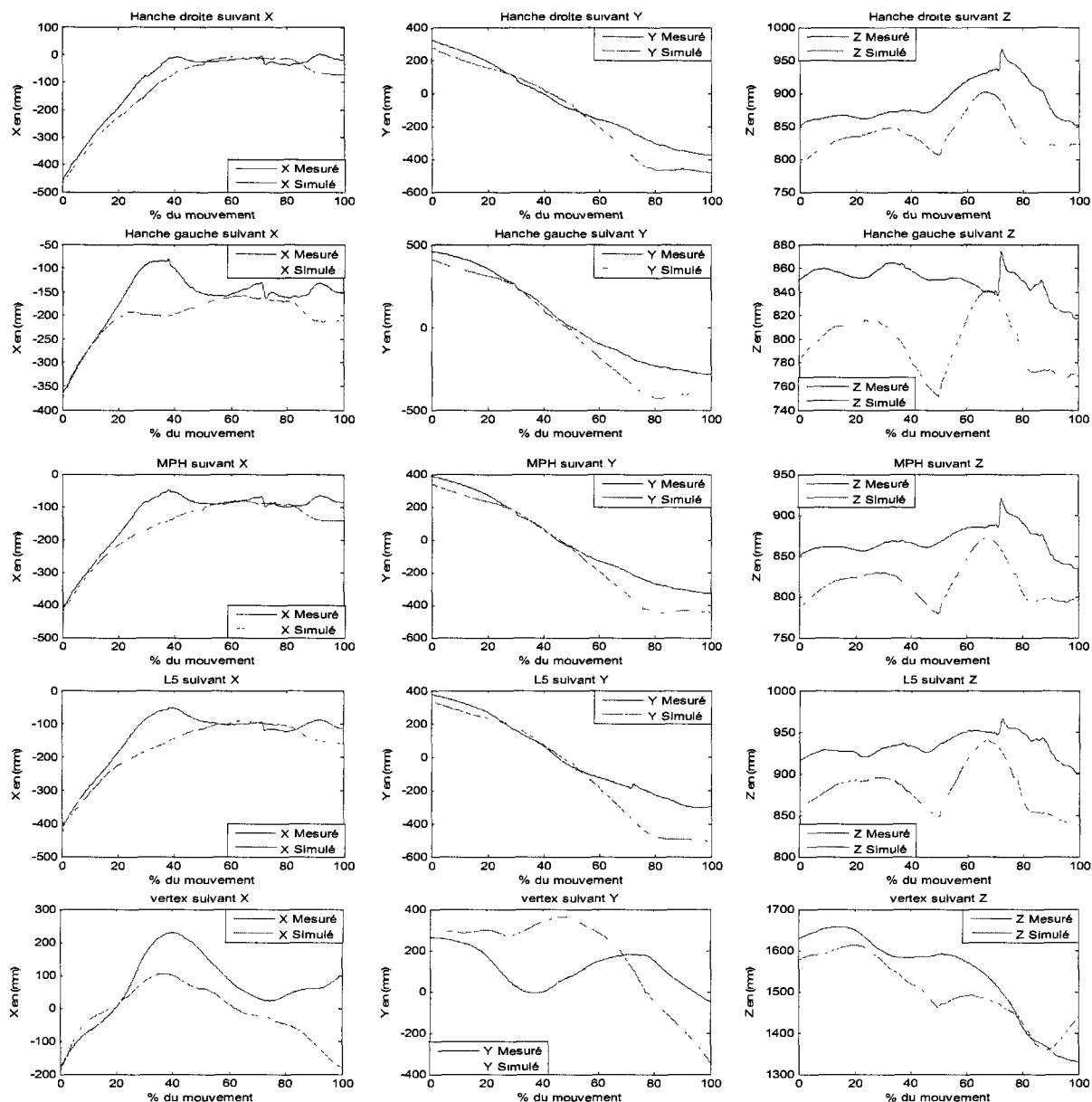


Figure 4 19. Trajectoires mesurées et simulées sur le « grand véhicule » des points caractéristiques pour le sujet 16 réalisant la sous stratégie TB exprimées dans le repère lié au laboratoire.

Le tableau 4.19 donne les coefficients de corrélation et les RMS Normalisées calculés entre les trajectoires des points caractéristiques mesurées et simulées sur le Véhicule Simulation (ici « le grand véhicule »).

	X		Y		Z	
	r	RMSN	r	RMSN	r	RMSN
Bout pied droit	0.970	0.142	0.921	0.13	0.834	0.414
Bout pied gauche	0.079	0.71	0.991	0.457	0.479	0.523
MPH	0.967	0.119	0.993	0.111	0.807	0.384
Hanche droite	0.986	0.081	0.990	0.106	0.849	0.307

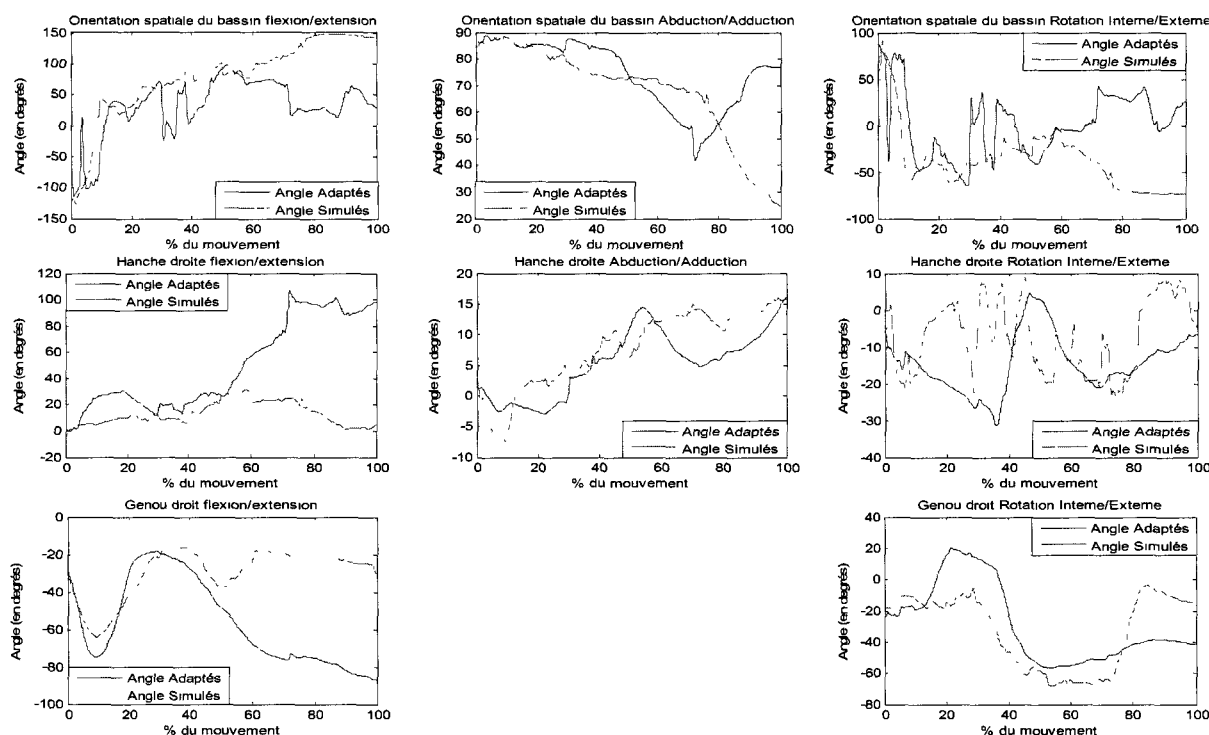
Hanche gauche	0.904	0.181	0.996	0.115	0.665	0.471
L5	0.952	0.131	0.987	0.145	0.830	0.435
Vertex	0.847	0.251	0.651	0.339	0.955	0.205

Tableau 4 19. Coefficients de corrélation et RMS Normalisées calculés entre les trajectoires des points caractéristiques mesurées et simulées pour le sujet 16 réalisant la sous stratégie TB.

Le tableau 4.19 fait apparaître dans l'ensemble de bonnes corrélations pour le bout du pied droit, MPH et la hanche droite. Au contraire, les résultats sont moins bons pour les trajectoires du bout du pied gauche, la hanche gauche et le vertex. Les hypothèses, mais aussi la variabilité au sein d'une même stratégie peut expliquer en partie un tel résultat. Nous revenons plus amplement sur les possibles causes des différences observées en perspectives (Cf. Chapitre 5).

4.3.4.2 Simulation des angles articulaires et de l'orientation du bassin sur le Véhicule Simulation

Les angles articulaires et l'orientation spatiale du bassin sont calculés tels que les points « caractéristiques » attachés à l'humanoïde suivent « au mieux » les trajectoires des points « caractéristiques » précédemment simulés. La figure 4.20 présente les angles articulaires et l'orientation spatiale adaptés et simulés sur le Véhicule Simulation (« le grand véhicule »).



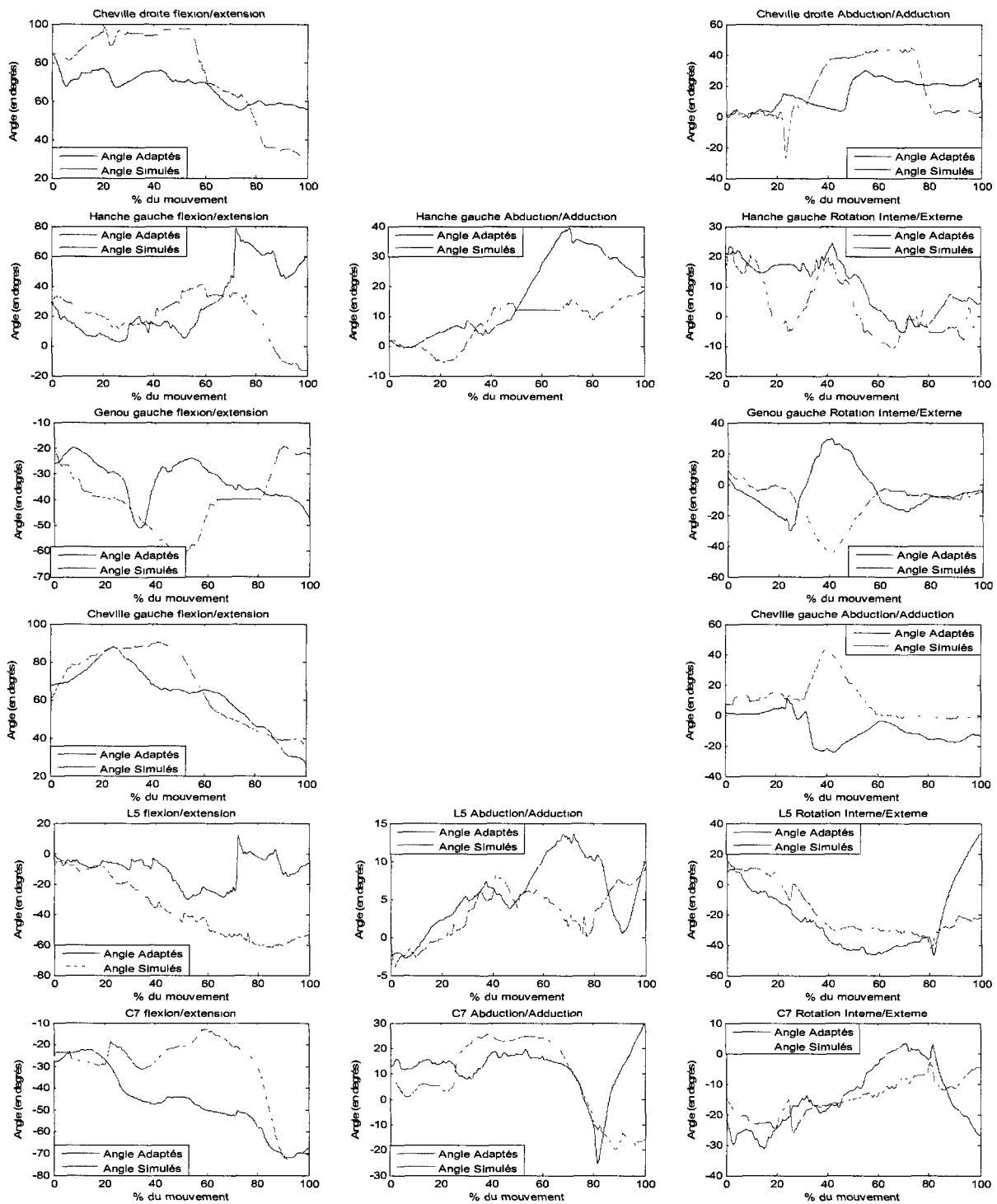


Figure 4.20. Orientation spatiale du bassin et angles articulaires adaptés et simulés sur le Véhicule Simulation (le « grand véhicule ») pour le sujet 16 réalisant la sous stratégie TB.

Le tableau 4.20 présente les coefficients de corrélation et les RMS normalisées calculés entre les angles articulaires et l'orientation spatiale du bassin adaptés et simulés sur le Véhicule Simulation (le « grand véhicule »).

	Flexion/Extension		Abduction/adduction		Rotation Interne/Externe	
	R	RMSN	R	RMSN	r	RMSN
Bassin	0.826	0.301	0.70	0.284		
Cheville droit	0.924	0.327	0.713	0.300	-	-
Genou droit			-	-	0.811	0.242
Hanche droite			0.901	0.190		
Cheville gauche	0.937	0.195			-	-
Genou gauche			-	-		
Hanche gauche			0.862	0.291	0.876	0.278
L5			0.712	0.281	0.794	0.241
C7	0.819	0.408	0.673	0.298	0.811	0.272

Tableau 4 20. Coefficients de corrélation et RMS Normalisées calculés entre les angles articulaires et l'orientation spatiale adaptés et simulés sur le Véhicule Simulation (le « grand véhicule ») pour le sujet 16 réalisant la sous stratégie TB.

Comme pour la stratégie à 1 pied, les résultats obtenus peuvent être classés en 3 catégories, les résultats relativement bons (représentés en vert, pour $r \geq 0.80$ et $NRMS \leq 0.30$), relativement moyens (représentés en jaune, pour $r \geq 0.80$ ou $NRMS \leq 0.30$) et plutôt « mauvais » (représentés en rouge, pour $r < 0.80$ et $NRMS > 0.30$).

- Les résultats relativement bons regroupent : la rotation interne/externe du genou droit, l'abduction/adduction de la hanche droite, la flexion/extension de la cheville gauche, l'abduction/adduction et la rotation interne/externe de la hanche gauche et la rotation interne/externe de C7.

- Les résultats relativement moyens regroupent : la flexion/extension et l'abduction/adduction du bassin, la flexion/extension et l'abduction/adduction de la cheville droite, l'abduction/adduction et la rotation interne/externe de L5 et la flexion/extension et l'abduction/adduction de C7.

- Les résultats plutôt « mauvais » regroupent : la rotation interne/externe du bassin, la flexion/extension du genou droit, la flexion/extension et la rotation interne/externe de la hanche droite, l'abduction/adduction de la cheville gauche, flexion/extension et la rotation interne/externe du genou gauche, la flexion/extension de la hanche gauche et la flexion/extension de L5.

Ces résultats montrent globalement que 1) le bassin est plutôt mal orienté dans l'espace, 2) la flexion/extension de L5 n'est pas satisfaisante et que les résultats se dégradent plus on se rapproche des pieds.

Ces résultats étaient prévisibles, comme pour la stratégie à 1 pied, compte tenu des trajectoires des points caractéristiques simulés présentés précédemment. Nous revenons plus amplement sur les raisons de telles différences en perspective (Cf. Chapitre 5).

La figure 4.21 présente en quelques images (une chaque 10%) le mouvement simulé et le mouvement mesuré sur le « grand véhicule » pour la sous stratégie TB. Malgré les différences relevées entre les angles articulaires et l'orientation spatiale du bassin adaptés et simulés, ces représentations font apparaître des ressemblances entre les mouvements adaptés et simulés.

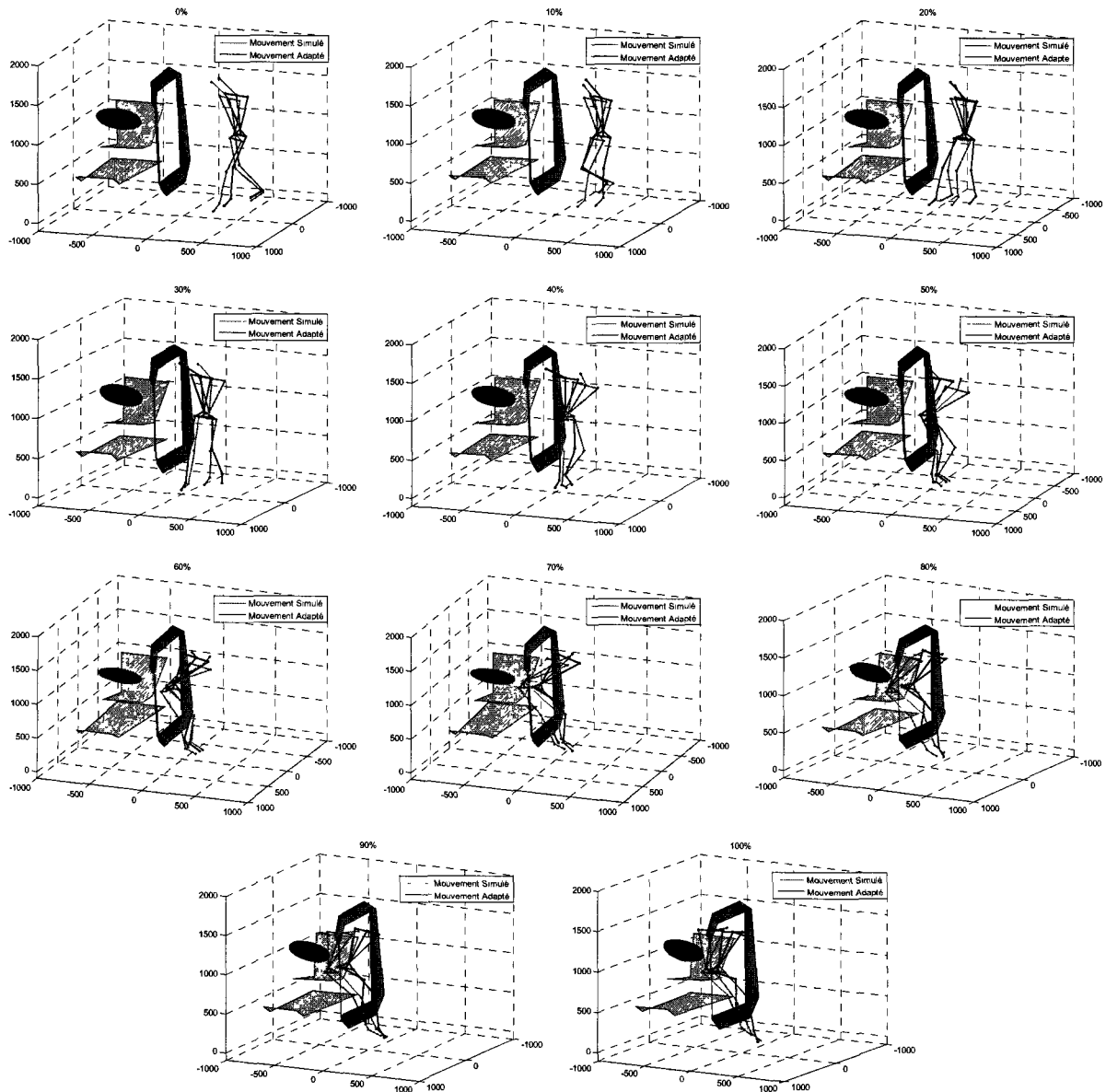


Figure 4 21. Postures simulées et postures mesurées sur le « grand véhicule » pour le sujet 16 réalisant la sous stratégie TB.

4.3.4.3 Etude de la sous stratégie du mouvement simulé

Cette partie vise à vérifier l'appartenance du mouvement simulé à la stratégie retenue pour la simulation sur le Véhicule Simulation.

- *Détermination des représentants pour chaque stratégie d'entrée*

Les caractéristiques des sujets fictifs représentant chaque sous stratégie d'entrée identifiée sur le Véhicule Simulation (le « grand véhicule ») sont présentées dans le tableau 4.15. L'annexe A.4.3 présente les distances entre le sujet fictif représentant la sous stratégie TB et les sujets réalisant cette sous stratégie sur le « grand véhicule ».

- *La Sous stratégie du mouvement simulé*

Le tableau 4.17 (Cf. §4.3.3.3) donne un extrait des caractéristiques des sujets réels représentant « au mieux » les stratégies d'entrée identifiées sur le Véhicule Simulation. Le tableau 4.21 présente les distances calculées entre le mouvement simulé et les mouvements des sujets représentant les sous stratégies d'entrée sur le Véhicule Simulation.

	Représentants des différentes stratégies sur le « grand véhicule »				
	LS (S34)	MM (S20)	TB (S30)	TF (S37)	FM (S03)
Distance	4.99	4.56	3.86	4.66	4.75

Tableau 4 21. Distances calculées entre les caractéristiques angulaires du mouvement simulé et celles des sujets représentants des différentes sous stratégies identifiées sur le « grand véhicule ».

Le tableau 4.21 montre que cette distance est minimale (3.86) pour la sous stratégie TB. Le mouvement simulé relève donc bien de la stratégie TB, stratégie adoptée par le sujet sur le Véhicule Expérimental et ici simulé sur le Véhicule Simulation.

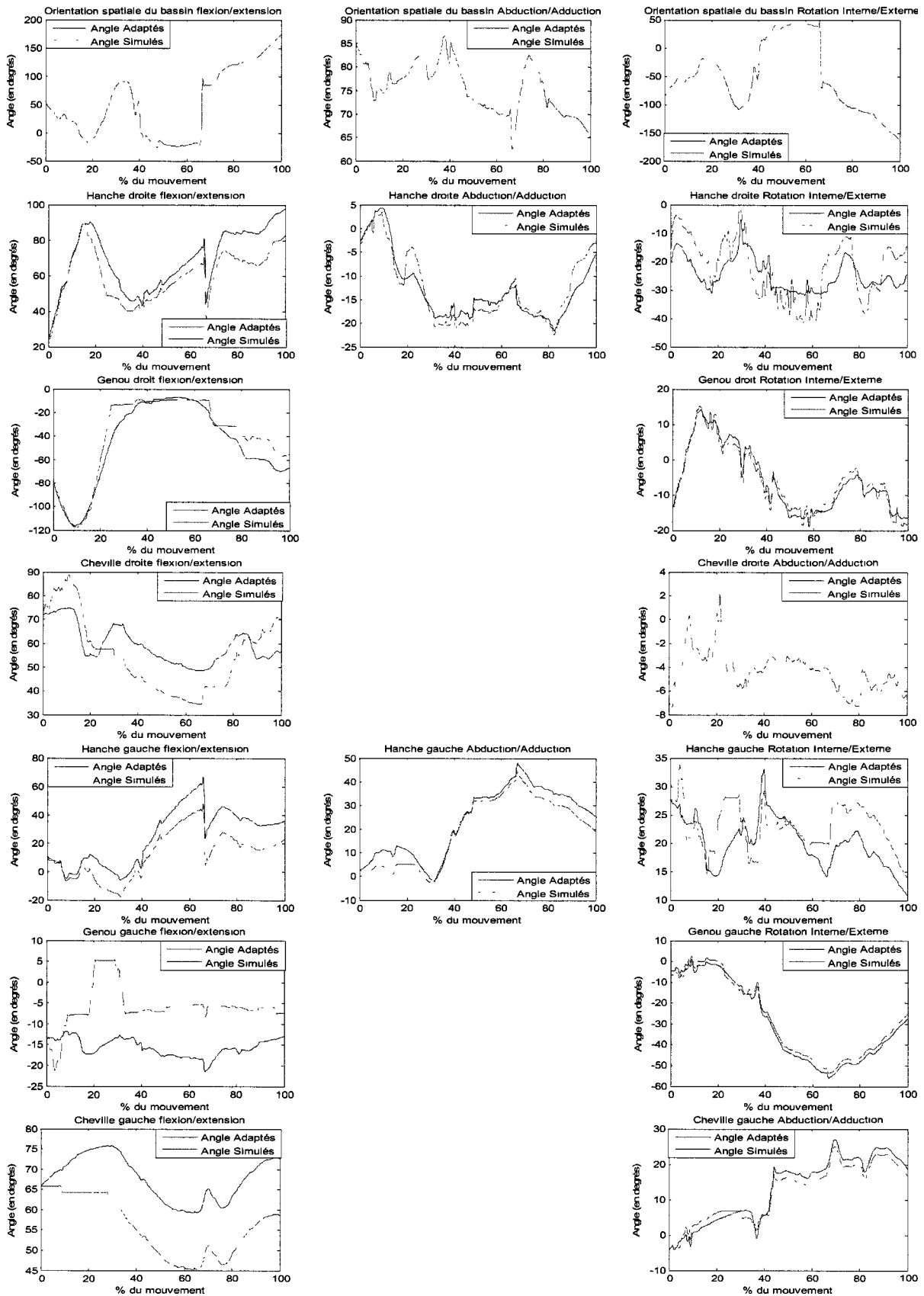
4.3.5 Simulation VéhExpérimental(p) → VéhSimulation(g)

L'objectif est de simuler sur le Véhicule Simulation (le « grand véhicule ») la stratégie d'entrée adoptée par un sujet sur le Véhicule Expérimental (le « petit véhicule »), mais qui n'avait pas été retenue par ce sujet sur le Véhicule Simulation lors des expérimentations. L'exemple traité concerne un sujet âgé de 70 ans, mesurant 1.72 m, pesant 85 kg, muni d'une prothèse de genou gauche, et ayant adopté la sous stratégie MM sur le « petit véhicule » et la sous stratégie FM sur le « grand véhicule ». Nous renvoyons le lecteur à l'annexe A.4.3 pour la simulation d'un sujet de petite taille changeant de stratégie lors de son passage entre « le petit et le grand véhicule ».

4.3.5.1 Simulation des angles articulaires et orientation spatiale du bassin sur le Véhicule Simulation

Dans un premier temps, les trajectoires des points « caractéristiques » sont simulées sur le Véhicule Simulation à l'aide des informations extraites du mouvement réalisé par le sujet sur Véhicule Expérimental. Puis, les angles articulaires et l'orientation spatiale du bassin sont calculés tels que les trajectoires des points « caractéristiques » attachés à l'humanoïde suivent « au mieux » les trajectoires des points « caractéristiques » simulées.

La figure 4.22 présente les angles articulaires et l'orientation spatiale du bassin adaptés sur le Véhicule Expérimental (le « petit véhicule ») et simulés sur le Véhicule Simulation (le « grand véhicule »).



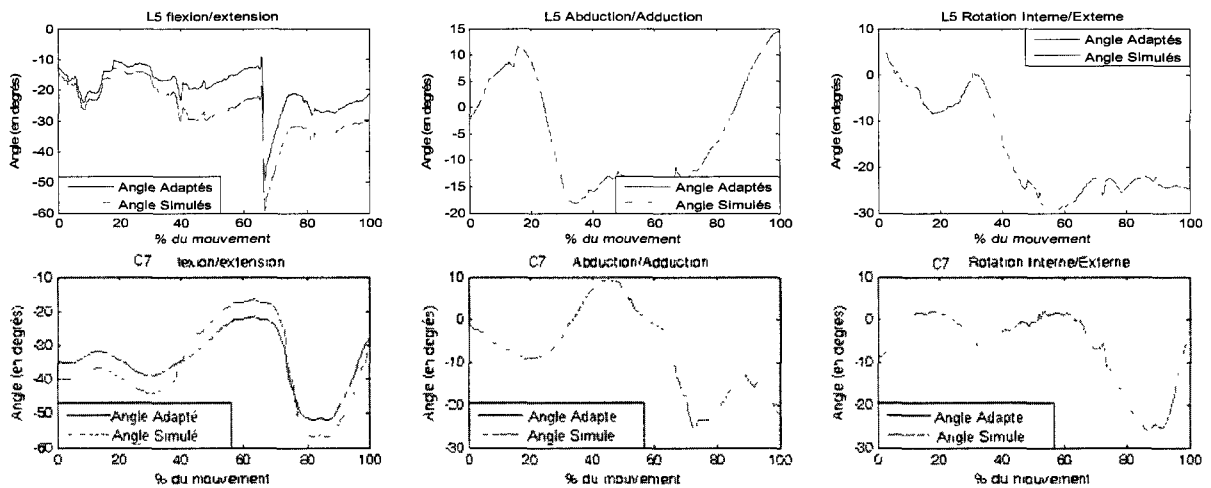


Figure 4 22. Orientation spatiale du bassin et angles articulaires et orientation spatiale adaptés sur Véhicule Expérimental (le « petit véhicule ») et simulés sur le Véhicule Simulation (le « grand véhicule ») pour le sujet 19 réalisant la sous stratégie MM.

Cette figure montre de bonnes ressemblances pour certains angles (ex. les angles d’orientation spatiale du bassin, les angles en C7, en L5). Au contraire, d’autres angles diffèrent de manière importante. C’est le cas des angles de flexion/ extension des genoux, des chevilles ou encore de la hanche gauche. Cette figure fait apparaître également certaines anomalies au niveau des angles de flexion/extension du genou droit, genou gauche et de l’angle de rotation interne/externe de la hanche gauche.

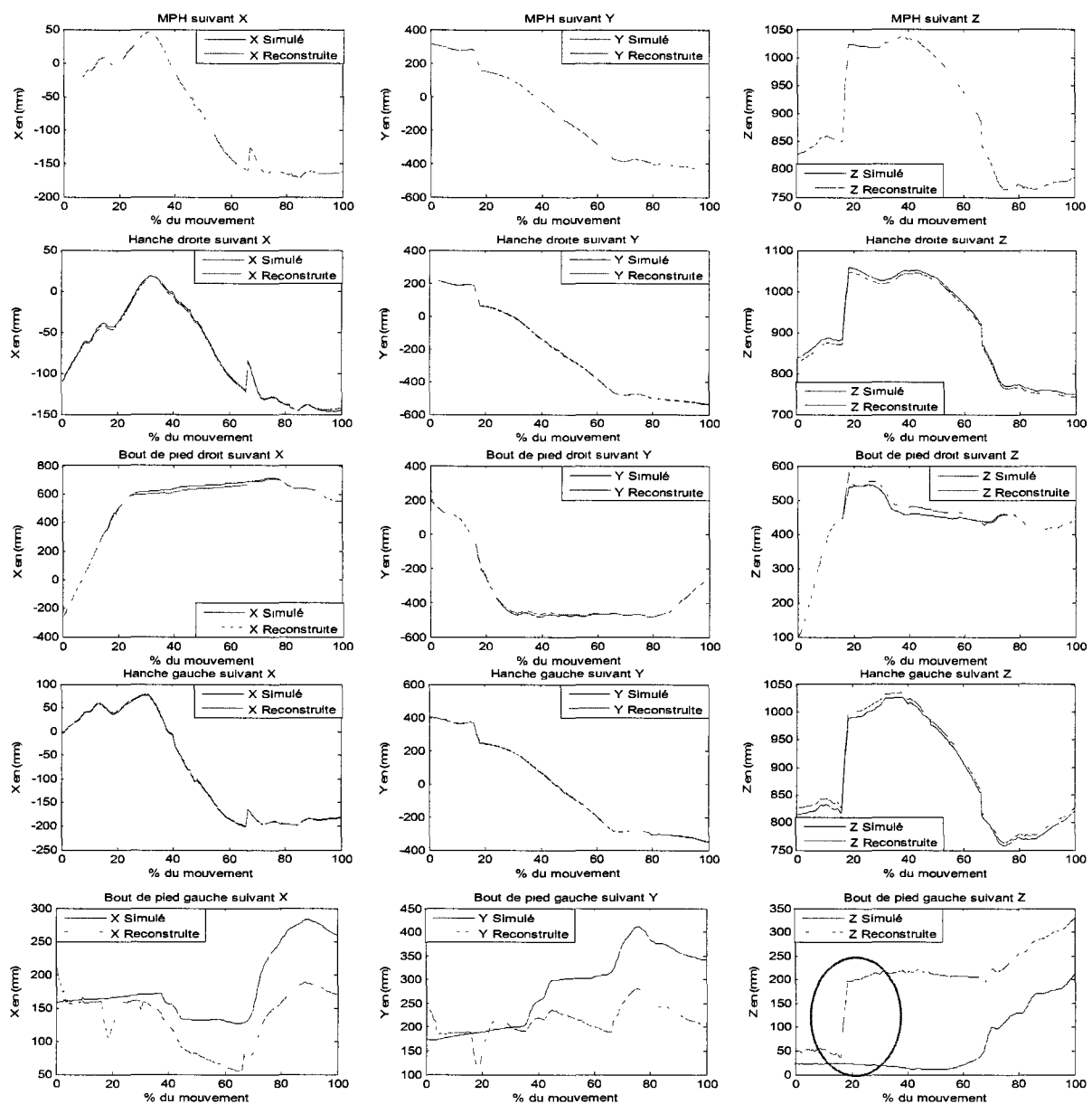
Le tableau 4.22 présente les coefficients de corrélation entre les angles articulaires et l’orientation spatiale du bassin adaptés sur le Véhicule Expérimental (le « petit véhicule ») et simulés sur le Véhicule Simulation (le « grand véhicule »).

	Flexion/Extension	Abduction/adduction	Rotation Interne/Externe
	r	R	R
Bassin	1	1	1
Cheville droit	0,891	1	-
Genou droit	0,987	-	0,992
Hanche droite	0,973	0,970	0,863
Cheville gauche	0,936	0,996	-
Genou gauche	0,439	-	0,999
Hanche gauche	0,981	0,993	0,762
L5	0,967	1	1
C7	0,982	1	1

Tableau 4 22. Coefficients de corrélation calculés entre les angles articulaires et l’orientation spatiale du bassin adaptés sur le Véhicule Expérimental et simulés sur le Véhicule Simulation pour le sujet 19 réalisant la sous stratégie MM.

Pour les angles de l'orientation spatiale du bassin et les angles articulaires de la cheville droite, du genou droit, de la hanche droite, de la cheville gauche, de rotation interne/ externe du genou gauche, de flexion/ extension et abduction/ adduction de la hanche gauche, de L5 et de C7 le coefficient de corrélation est supérieur à 0.85. Au contraire, il n'est que de 0.76 pour l'angle de rotation interne/ externe de la hanche gauche et de 0.44 pour l'angle de flexion/ extension pour le genou gauche.

La figure 4.23 présente les trajectoires des points « caractéristiques » reconstruites (obtenus à l'aide du MGD en injectant les angles simulés) et simulées sur le Véhicule Simulation (le « grand véhicule ») exprimées dans le repère lié au laboratoire.



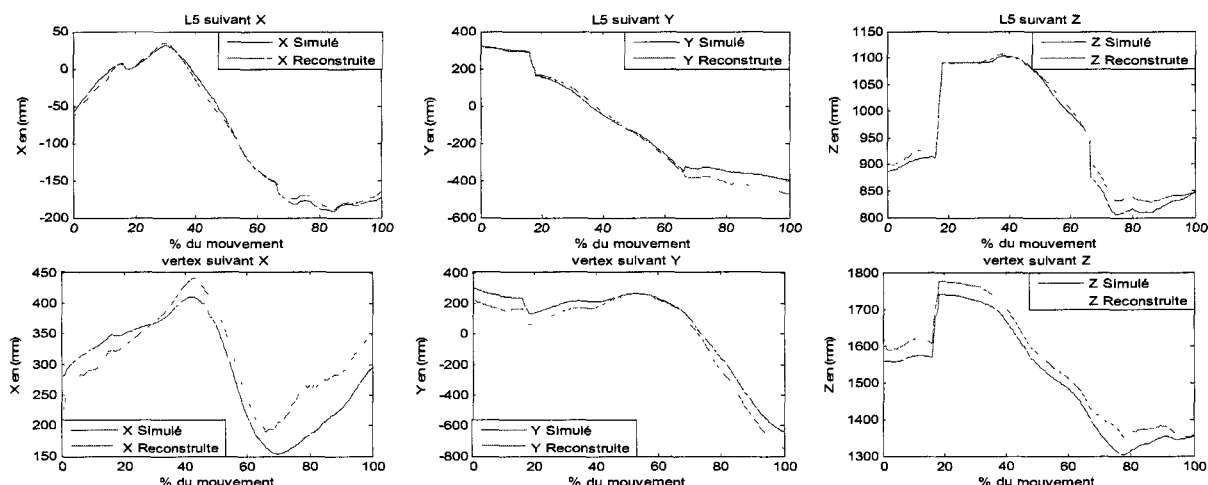


Figure 4 23. Trajectoires des points caractéristiques reconstruites (à l’aide du MGD) et simulées dans le Véhicule Simulation (le « grand véhicule ») pour le sujet 19 réalisant la sous stratégie MM exprimées dans le repère lié au laboratoire.

Cette figure fait apparaître un « saut » non réaliste dans la trajectoire du pied gauche d’environ 20 cm. Le tableau 4.23 présente les coefficients de corrélation et les RMS Normalisée entre les trajectoires reconstruites (à l’aide du MGD) et simulées des points « caractéristiques ».

	X		Y		Z	
	r	RMSN	R	RMSN	r	RMSN
MPH	1	0	1	0	1	0
Hanche droite	1	0.0111	1	0.0023	0.9999	0.0256
Bout de pied droit	0.9995	0.0156	0.9997	0.0118	0.9975	0.0269
Hanche gauche	1	0.0066	1	0.0024	0.9999	0.0308
Bout de pied gauche						
L5	0.9993	0.0232	0.9985	0.0470	0.9993	0.0476
Vertex	0.9516	0.1931	0.9981	0.0603	0.9986	0.0938

Tableau 4 23. Coefficients de corrélation et RMS Normalisées entre les trajectoires reconstruites (à l’aide du MGD) et simulées pour le sujet 19 réalisant la sous stratégie MM.

En dehors du bout de pied gauche, les coefficients de corrélation sont supérieurs à 0.95 et les RMSN sont inférieures à 15%. Au contraire, pour le bout de pied gauche, l’erreur peut atteindre les 86% (selon Z).

La figure 4.24 présente en quelques images (une chaque 10%) le mouvement simulé. Il est mis en évidence à 20% le « saut » (non réaliste) réalisé par l’humanoïde de synthèse pour respecter « au mieux » les différentes contraintes de la simulation.

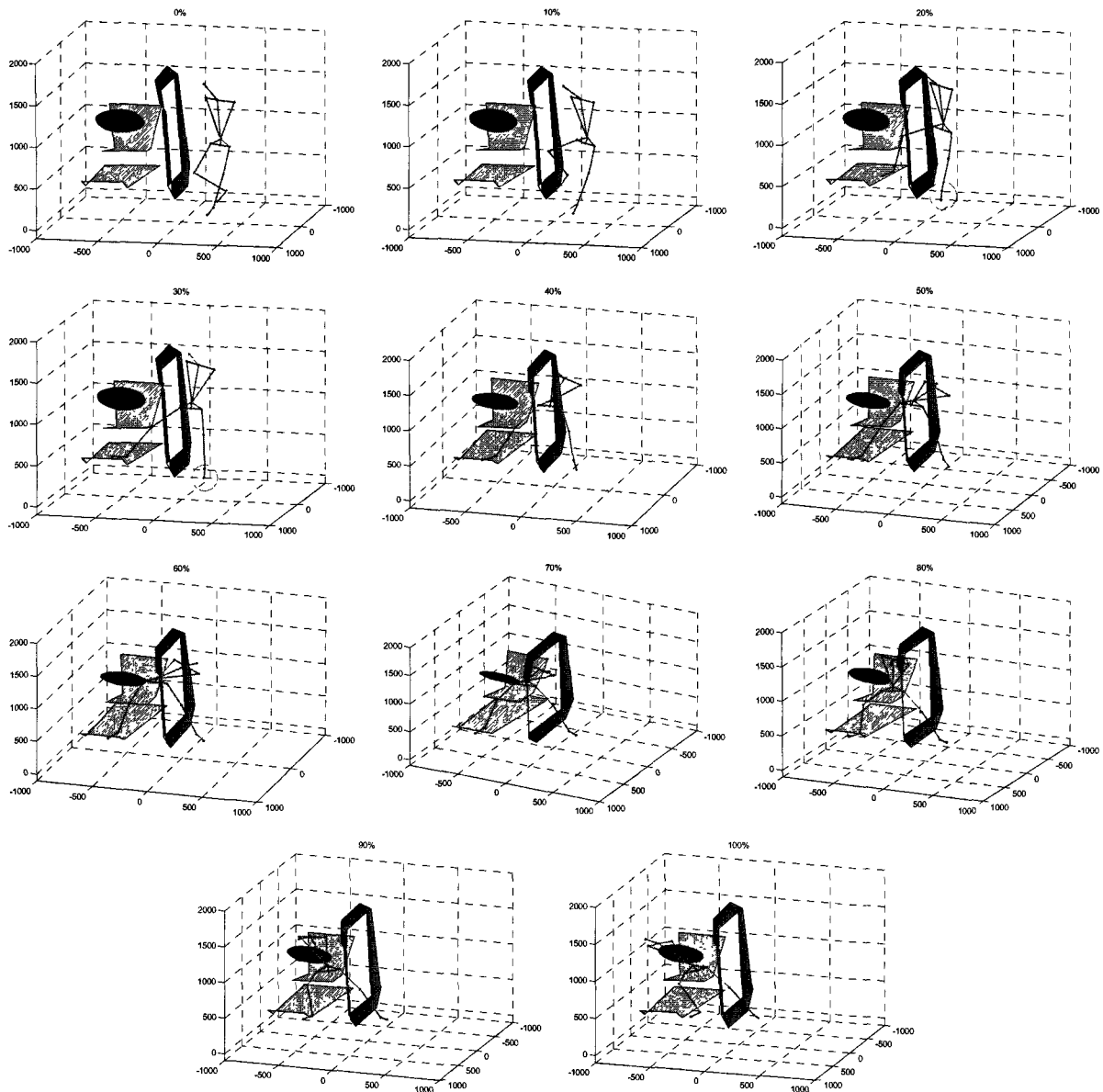


Figure 4 24. Postures simulées sur le Véhicule Simulation (le « grand véhicule ») pour le sujet 19 réalisant la sous stratégie MM.

4.3.6. Discussion

Quatre simulations ont été réalisées en appliquant la démarche méthodologique de simulation de mouvement d'entrée dans un véhicule automobile à géométrie variable.

La première simulation avait pour objet de simuler le mouvement d'entrée d'un sujet dans le « petit véhicule » à partir des informations extraites du mouvement d'entrée « expérimental » réalisé par le même sujet sur le même « petit véhicule ». Les résultats de simulation ont montré de très fortes corrélations entre les angles simulés et les angles expérimentaux (modifiés). Si de tels résultats étaient prévisibles, il était néanmoins important de vérifier ce cas afin de « valider » les développements numériques.

La deuxième et la troisième simulation avaient pour objet de simuler le mouvement d'entrée d'un sujet adoptant la stratégie à un pied, puis d'un autre sujet adoptant la stratégie à deux pieds dans le « grand véhicule » à partir des informations extraites des mouvements d'entrée « expérimentaux » réalisés par les mêmes sujets sur le « petit véhicule ». Dans les deux cas, les résultats, qui comparent les angles simulés et expérimentaux (modifiés), se sont révélés moins bons. Ils montrent globalement que 1) le bassin est mal orienté dans l'espace, 2) la flexion/extension du tronc (en C7) n'est pas satisfaisante et les résultats se dégradent plus on se rapproche des pieds. Bien qu'éloigné des mesures, les mouvements simulés sont cependant conformes aux sous stratégies adoptées par les sujets sur le « grand véhicule » lors des expérimentations.

La dernière simulation avait pour objectif de montrer la faisabilité d'une sous stratégie (non identifiée dans le cas expérimental sur le grand véhicule) par la simulation. Des résultats « erronés » sont obtenus, se traduisant par un saut vertical de l'humanoïde de synthèse. Ce résultat s'explique par plusieurs raisons. En effet, la géométrie du véhicule (plancher relativement haut et siège profond) à laquelle s'ajoute la déficience du sujet se traduisent par des contraintes de simulation. Celles-ci contraignent l'humanoïde de synthèse à réaliser un mouvement « non réaliste » pour entrer dans le « grand véhicule » avec la stratégie adoptée (MM) sur le « petit véhicule ». Ce résultat est à rapprocher de l'expérimentation où le sujet a dû changer de stratégie lors de son passage du « petit véhicule » vers le « grand véhicule ».

4.3.7. Robustesse du simulateur

Il est présenté dans ce paragraphe uniquement le résultat concernant la variation d'un seul paramètre, en l'occurrence la hauteur de siège.

Il s'agit donc de simuler le mouvement d'entrée d'un sujet âgé de 75 ans, mesurant 1.95m, pesant 90kg, muni d'une prothèse de hanche droite et ayant adopté la sous stratégie LS (Lateral Sliding) sur le « petit véhicule » et sur le « grand véhicule ». La hauteur du siège du « petit véhicule » est de 530 mm. Le processus incrémente la hauteur du siège à chaque nouvelle simulation de 25 mm. Il est trouvé, que pour une hauteur du siège de 680 mm (150 mm d'augmentation), la tête de sujet entre en collision avec le brancard du véhicule (Cf. Fig. 4.25).

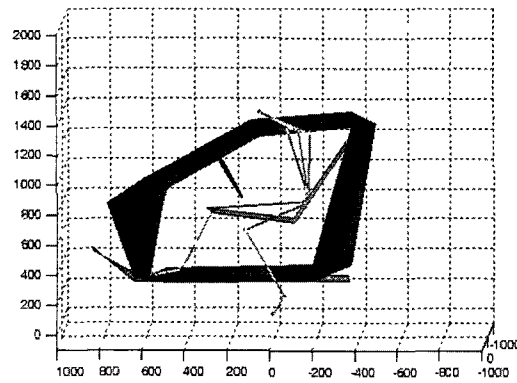


Figure 4 25. *Collision de la tête de l’humanoïde et du brancard pour la sous stratégie LS pour un siège de hauteur égale à 680 mm (du sol).*

La figure 4.25 montre une « limite » pour la simulation du mouvement d’entrée pour le sujet 12 et pour la sous stratégie LS. Cette limite est relevée ici par la collision de la tête de l’humanoïde représentative du sujet 12 avec le brancard du véhicule. On pourrait donc conclure qu’au delà de 150 mm le simulateur ne peut plus générer un mouvement réaliste sur ce véhicule pour le sujet 12 adoptant la sous stratégie LS. Un tel travail pourrait alors être étendu à tous les paramètres du véhicule de manière à définir la plage d’utilisation du simulateur.

Néanmoins, dans la pratique et compte tenu de la nature « adaptative » de l’être humain, le sujet 12 aurait pu adopter une autre stratégie pour entrer dans le nouveau véhicule (véhicule avec un siège haut de 680 mm du sol). En effet, l’exemple traité dans le paragraphe §4.3.5 montre que la structure virtuelle représentative du sujet 19 n’a pas pu entrer dans le « grand véhicule » avec la même stratégie adoptée par le sujet sur le « petit véhicule » (MM). Pourtant, lors des expérimentations le sujet est entré dans le « grand véhicule ». Le sujet a réussi à entrer dans le « grand véhicule » en adoptant une nouvelle sous stratégie (FM). Il s’est accroché au volant et à tiré son corps en un seul mouvement vers l’intérieur du véhicule (Cf. § 4.2.3.4 pour la description de la stratégie FM). Il y a eu donc un « changement de stratégie ». Cela nous conduit à conclure qu’en cas d’impossibilité de réalisation d’une stratégie donnée en simulation pour un sujet donné sur un véhicule donné le sujet pourra basculer vers une autre stratégie plus « convenable » pour sa condition physique et l’environnement (la géométrie du véhicule).

Ce simulateur pourrait donc s’avérer être un outil permettant d’identifier les dimensions véhicules au-delà desquelles un sujet donné pratiquant une certaine sous stratégie initialement serait amené à changer de sous stratégie.

4.3.6 Conclusion

Cette deuxième partie a présenté les résultats de simulation. Les trois premiers exemples ont concerné la simulation du mouvement d’entrée dans le Véhicule Simulation à

partir des informations extraites d'un mouvement réalisé sur le Véhicule Expérimental. Le premier exemple visait à simuler le mouvement d'entrée dans le « petit véhicule » à partir des informations extraites du mouvement réalisé sur le « petit véhicule ». Cet exemple a mis en évidence de relativement bons résultats et a « validé » en quelques sortes les algorithmes développés. Les 2 exemples suivants visaient à simuler le mouvement d'entrée dans « le grand véhicule » à partir d'informations extraites du mouvement d'entrée réalisée sur le « petit véhicule » pour une sous stratégie à 1 pied et à 2 pieds. Les résultats quantitatifs obtenus mettent en évidence des similitudes mais aussi des dissemblances entre les angles adaptés et simulés. Néanmoins, les visuels du mouvement simulé sont relativement conformes au mouvement mesuré. De plus, il est vérifié pour chaque exemple que le mouvement d'entrée simulé est bien de la sous stratégie désirée. Un dernier exemple a traité le cas particulier où le mouvement à simuler sur le Véhicule Simulation était construit à partir d'une sous stratégie adoptée sur le Véhicule Expérimental, mais qui n'avait pas été adoptée lors des expérimentations. Il a été montré que l'algorithmique mis en œuvre ne permet pas la simulation du mouvement d'entrée dans le Véhicule Simulation sans anomalie. En l'occurrence ici, l'humanoïde de synthèse a du réalisé un « saut vertical » non réaliste pour entrer dans le Véhicule Simulation (le « grand véhicule »). Enfin, un petit travail a été mené afin d'étudier la robustesse du simulateur. Il apparaît qu'il est possible de définir pour chaque sujet, de la base de mouvements exploitables, les limites des paramètres véhicules au-delà (ou en dessous) desquels la simulation n'est plus réaliste. Ces limites pourraient définir des frontières au-delà desquelles les sujets pour entrer dans le véhicule doivent recourir à une nouvelle sous stratégie.

4.4 CONCLUSION

Ce chapitre a présenté les résultats obtenus avec la démarche méthodologique proposée dans le cadre de ce mémoire pour simuler la cinématique du mouvement d'entrée dans un véhicule automobile pour un même sujet.

La première partie de ce chapitre a présenté les résultats de l'étape 2 de la démarche. Elle concerne l'analyse et l'identification des stratégies motrices d'entrée dans un véhicule automobile. Deux stratégies (à « 1 pied » et à « 2 pieds ») et 5 sous stratégies (LS, BM, FM, TB et TF) ont été identifiées Ait El Menceur et al. (Ait El Menceur et al., 2008a) ; Une 6^{ème} sous stratégie (MM) a été isolée via l'approche automatique développée. Cette approche se révèle donc plus précise. Par ailleurs, elle ne demande aucune expertise et ne souffre donc pas des problèmes liés à la reproductibilité et à la répétabilité inhérente à l'observation. Enfin, l'approche proposée offre l'avantage de classer les sujets en fonction de données quantitatives (des variables articulaires, par ailleurs discriminantes), données qui ont été utilisées à l'étape visant la simulation du mouvement.

La deuxième partie de ce chapitre présente les résultats de simulation. Quatre exemples sont traités, de la simple vérification à l'utilisation du simulateur comme outil d'aide à l'interprétation des changements de stratégie observée. Pour les 3 premiers exemples, la stratégie d'entrée adoptée par le sujet dans le Véhicule Simulation est identique à celle adoptée sur le Véhicule Expérimental. Les mouvements simulés sont validés vis-à-vis des stratégies retenues pour la simulation. La sous stratégie retenue pour la simulation dans le quatrième exemple sur le Véhicule Simulation n'est pas adoptée par le sujet retenu en réalité. Cette simulation « échouée » et un petit travail concernant la robustesse du simulateur a montré l'intérêt d'un tel simulateur pour prédire les changements de stratégie.

CHAPITRE 5
PERSPECTIVES DE RECHERCHES

CHAPITRE 5 : PERSPECTIVES DE RECHERCHES

5.1 INTRODUCTION

Ce chapitre présente des perspectives de recherches au travail rapporté dans ce mémoire. Le premier paragraphe, loin d'être exhaustif, revient succinctement sur les principaux résultats (identification des stratégies et la simulation du mouvement d'entrée) et expose quelques perspectives. Les paragraphes suivants décrivent différentes pistes permettant d'étendre les fonctionnalités du simulateur proposé.

5.2 RETOUR SUR LES RESULTATS ET QUELQUES PERSPECTIVES

Ce paragraphe résume les principaux résultats de ce travail caractérisés par l'identification des sous stratégies d'entrée dans un véhicule automobile, les résultats de simulation auxquels s'ajoute quelques perspectives.

5.2.1 Identification des stratégies d'entrée dans un véhicule automobile

5.2.1.1 Contexte

Dans le cadre de ce travail de doctorat, une procédure automatique d'identification des stratégies d'entrée dans un véhicule automobile est proposée. Elle est appliquée aux mouvements d'entrée réalisés par 33 et 37 sujets respectivement sur un petit véhicule et un monospace. Les sujets impliqués sont des sujets jeunes, âgés et/ou ayant des prothèses de genoux et/ou de hanches. Deux grandes stratégies d'entrée (l'entrée à un pied et l'entrée à deux pieds) et 6 sous stratégies (Cf. § 4.2) ont été identifiées. Cette procédure a l'avantage d'être automatique.

5.2.1.2 Problématique

- Les 2 véhicules utilisés dans cette étude ne constituent que 2 exemples de configurations véhicules.
- Le nombre de sujets impliqués est réduit.
- Les populations à mobilité réduite testées « ne couvrent pas » toutes les déficiences.

Par conséquent, d'autres sous-stratégies d'entrée dans un véhicule automobile peuvent exister.

5.2.1.3 Perspective

- *A court terme*

L'observation des mouvements d'entrée, réalisés sur les 4 véhicules retenus dans le projet HANDIMAN (Ait El Menceur et al., 2007), a permis de déterminer 5 sous-stratégies d'entrée. La procédure automatique d'identification des sous- stratégies appliquée aux mouvements réalisés sur 2 de ces véhicules a permis de déterminer une 6^{ème} sous-stratégie (la sous- stratégie MM). Par conséquent, l'application de la procédure automatique d'identification des sous- stratégies aux 2 autres véhicules, utilisés dans le projet HANDIMAN, peut mettre en évidence l'existence de nouvelles sous- stratégies.

- *A plus long terme*

- Réaliser des expérimentations avec un nombre de sujets plus important et représentatifs de l'hétérogénéité de la population française (jeunes, âgées, gros, grands de taille, ..., autres déficiences).
- Réaliser les expérimentations sur un véhicule paramétrable (Cf. § 1.3.2.1) afin d'étudier de nombreuses configurations de véhicules.

5.2.2 Retour sur les résultats de simulation

5.2.2.1 Contexte

Les résultats de simulation montrent que le mouvement simulé n'est pas la réplique fidèle du mouvement mesuré.

5.2.2.2 Problématique

Pouvons-nous retrouver « exactement » le mouvement réel à l'aide de la simulation ? Cherednichenko et al. (Cherednichenko et al., 2006) notent qu'un même sujet ne peut pas réaliser le même mouvement plusieurs fois sur un même véhicule. Ils mettent en cause les différences intra- individuelles des sujets.

5.2.2.3 Perspective

- *A court terme*

- Tenir compte des dispersions intra- individuelles et ne plus retenir des trajectoires de passage (des pieds, de la tête...) mais plutôt des volumes de passage (significatifs de ces dispersions).
- Générer un domaine de passage. Celui-ci sera significatif des mouvements générés à partir des volumes de passage.

Ainsi, le mouvement simulé pourrait être jugé valide si il est inclus « dans » le domaine de passage généré. Si tel est le cas, alors les résultats de simulation présentés dans ce mémoire pourraient s'éloigner de la mesure qu'à cause de la dispersion.

- *A plus long terme*

Si le mouvement simulé n'est pas inclus dans le domaine de passage, les hypothèses (Cf. §2.2.2) de l'étude seront révisées.

Hypothèse 1 : il est supposé que pour une sous- stratégie donnée, les « distances d'interaction » calculées entre le sujet et le véhicule automobile (quelque soit sa configuration) sont constantes.

L'étude de l'influence des différents paramètres véhicules sur le mouvement apparaît nécessaire pour préciser cette hypothèse. Une nouvelle fois, l'usage d'un véhicule paramétrable s'avère indispensable. L'objectif sera de déterminer des relations entre la géométrie du véhicule et le mouvement d'entrée (les points caractéristiques plus précisément).

Hypothèse 2 : il est supposé que pour une sous- stratégie donnée, les interactions, entre le sujet et le véhicule, se réalisent toujours au même moment proportionnellement à la durée de la phase d'entrée.

L'étude des mouvements d'entrée montre que les interactions ne se présentent pas toujours au même moment proportionnellement à la durée de la phase d'entrée. Par exemple, la figure 5.1 présente les trajectoires du pied droit suivant l'axe Z, d'un sujet âgé de 75 ans, mesurant 1.95m, pesant 90kg, muni d'une prothèse de hanche droite et ayant adopté la sous stratégie LS (« Lateral Sliding »), sur le « petit véhicule » et sur « le grand véhicule ». Pour cet exemple les proportions des (6) sous- phases sont différentes d'un véhicule à l'autre. Par conséquent, en phase de simulation (ex. sur le grand véhicule), les points caractéristiques ne peuvent plus être calculés aux instants caractéristiques du mouvement de référence (ex. celui du petit véhicule). L'influence des paramètres véhicules sur les proportions des sous- phases doit donc être étudiée plus précisément. Une nouvelle fois, l'usage d'un véhicule paramétrable apparaît nécessaire.

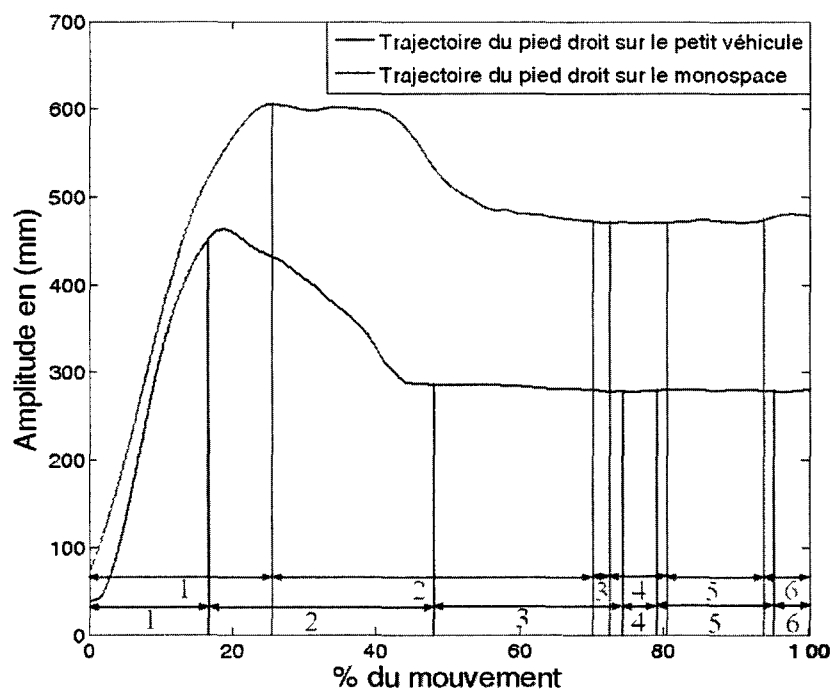


Figure 5 1. Trajectoire du pied suivant Z d'un sujet âgé de 75 ans, mesurant 1.95m, pesant 90kg, muni d'une prothèse de hanche droite et ayant adopté la sous stratégie LS (« Lateral Sliding »), sur le « petit véhicule » et sur « le grand véhicule ».

Ce premier paragraphe a présenté quelques perspectives aux principaux résultats obtenus. Les paragraphes suivants proposent des extensions au travail réalisé.

5.3 SIMULER LE MOUVEMENT D'ENTREE D'UNE PERSONNE DE TAILLE VARIABLE DANS UN VEHICULE DE GEOMETRIE VARIABLE

5.3.1 Contexte

Cette thèse a proposé une procédure de simulation de la cinématique du mouvement d'entrée dans des véhicules à géométrie variable. Elle fait suite aux travaux menés par Lempereur (Lempereur, 2006) visant à simuler la cinématique du mouvement d'entrée d'une personne de taille variable dans un véhicule à géométrie fixe.

5.3.2 Problématique

Le problème général est la simulation du mouvement d'entrée dans un véhicule automobile. Ce problème sous entend la simulation du mouvement d'entrée pour un sujet de taille variable (au moins) dans un véhicule de géométrie variable.

5.5.3 Perspective

La perspective vise à exploiter les travaux antérieurs. En l'occurrence, il s'agira de proposer une méthodologie de simulation qui tire son inspiration des travaux menés par

Lempereur (Lempereur, 2006) et ceux issus de la présente thèse. La figure 5.2 présente la méthodologie en 4 étapes qui pourrait être retenue.

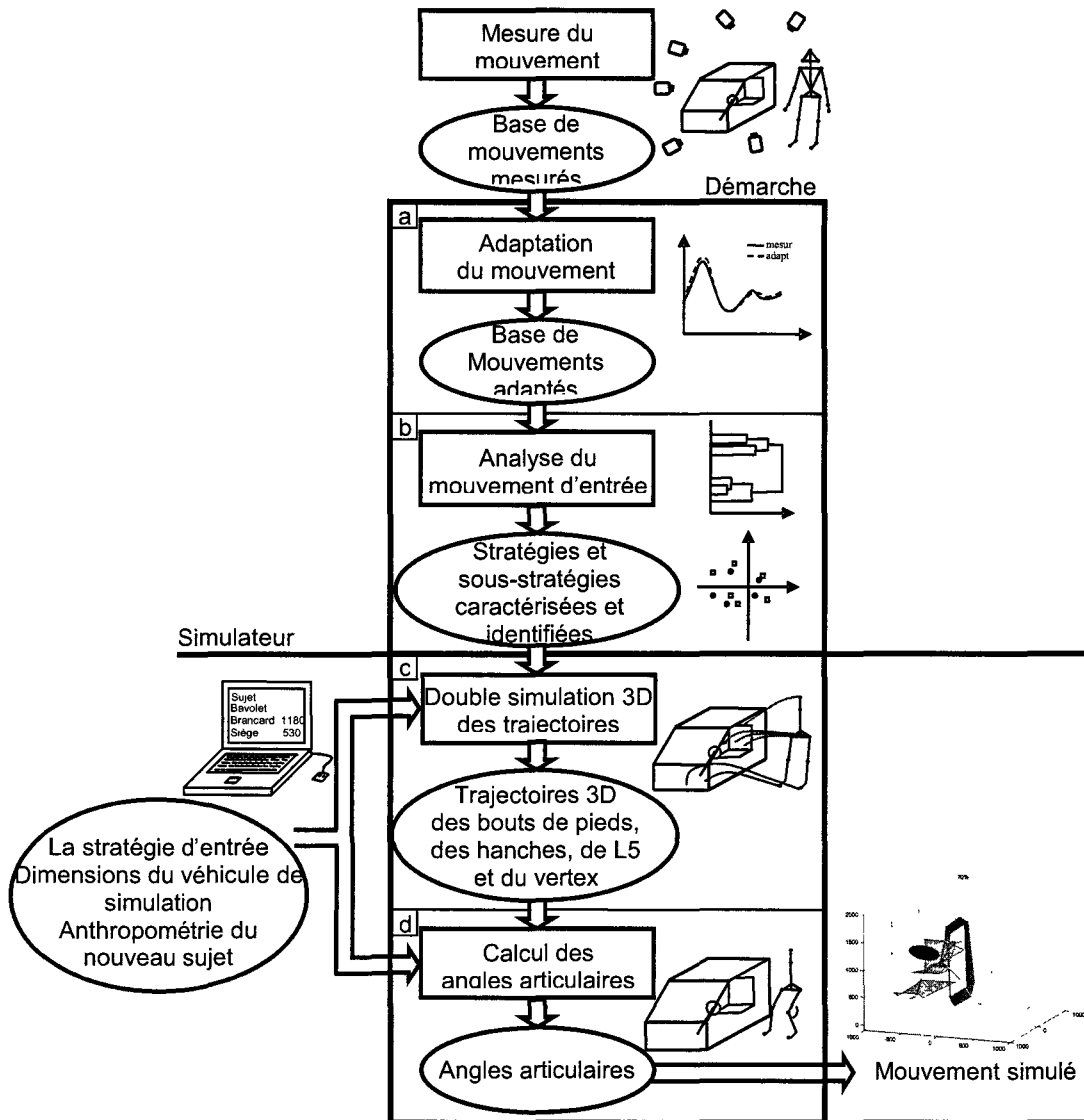


Figure 5 2. La démarche proposée pour simuler le mouvement d'entrée d'une personne de taille variable dans un véhicule à géométrie variable.

- Les étapes a et b portent sur la construction de la base de mouvements « exploitables » et l'identification des stratégies et sous stratégies du mouvement d'entrée. Le travail réalisé dans cette thèse pourra être utilisé (Cf. Chapitre 3 et § 2.5).
- L'étape c porte sur la simulation des trajectoires des bouts de pieds, des hanches de L5 et du vertex. Cette étape peut décomposer en deux phases.
 - ♦ La première phase consiste à déterminer le mouvement du nouveau sujet dans le véhicule utilisé par le représentant de la stratégie retenue pour la simulation. Ce travail reprend la méthodologie proposée par Lempereur (Lempereur, 2006). Les

caractéristiques cinématiques du représentant de la stratégie à simuler sont utilisées comme référence.

- ◆ La deuxième phase consiste à déterminer le mouvement de ce nouveau sujet dans le nouveau véhicule. Ce travail repose sur la méthodologie présentée dans ce mémoire. Le mouvement du (nouveau) sujet dans le véhicule (du représentant de la stratégie retenue) est utilisé comme référence.
- L'étape d porte sur la génération du mouvement du nouveau sujet sur le véhicule retenu pour la simulation. Les méthodes mises en œuvre dans la présente étude pourront être retenues (Cf. § 2.6.2.3).

5.4 CONSIDERER LA PHASE DE SORTIE

5.4.1 Contexte

Les travaux réalisés dans ce mémoire ont porté sur la simulation du mouvement d'entrée dans un véhicule automobile pour des sujets âgées et/ou munis de prothèse de hanche et/ou de genou.

5.4.2 Problématique

Petzäll (Petzäll, 1995), Rasmussen et Christensen (Rasmussen et Christensen, 2005) et Chateauroux (Chateauroux, 2009) soulignent l'importance de la phase de sortie lorsque la population étudiée est âgée et/ou à mobilité réduite.

5.4.3 Perspective

De premiers travaux ont déjà été entrepris durant cette thèse : Ait El Menceur et al. (Ait El Menceur et al., 2008a) déterminent 2 stratégies de sortie (sortie à un pied et sortie à deux pieds) et trois sous stratégies de sortie (HF : Head Forward, PV : Parallel to the vehicle et TFE : Two Feet Egress). La méthodologie proposée pourrait être appliquée au mouvement de sortie.

Par exemple, le mouvement de sortie doit être découpé et des instants caractéristiques doivent être déterminés en fonction des stratégies principales :

- Le mouvement de sortie peut être découpé en 3 phases :
 - ◆ Ouverture de la portière : cette phase commence quand le sujet pose sa main sur la poignée interne de la portière et se termine une fois la portière suffisamment ouverte pour permettre le mouvement de sortie.
 - ◆ Adaptation du mouvement de sortie : cette phase commence avec le décollement du pied gauche (ou des deux pieds, tout dépend de la stratégie) du plancher et se termine une fois le sujet en position debout les deux pieds sur le sol. C'est dans cette phase que les sous- stratégies sont les plus facilement observables.

- ◆ Finalisation du mouvement de sortie : lors de cette phase le sujet termine son mouvement et ferme la portière.

Des instants caractéristiques peuvent aussi être déterminés en fonction des principales stratégies :

- Stratégie de sortie à un pied. Cette stratégie contient 2 sous stratégies : la sous stratégie HF (Head Forward) et PV (Parallel to the Vehicle) (Ait El Menceur et al., 2008a). Les instants caractéristiques sont :
 - ✓ Décollement du pied gauche du plancher.
 - ✓ Passage du pied gauche au dessus du bavolet.
 - ✓ Positionnement du pied gauche sur le sol.
 - ✓ Décollement du bassin du siège.
 - ✓ Passage de la tête au dessus du brancard.
 - ✓ Décollement du pied droit du plancher
 - ✓ Passage du pied droit au dessus du bavolet
 - ✓ Positionnement des deux pieds sur le sol et posture debout du sujet.
- Stratégie de sortie à deux pieds. Cette stratégie contient un sous stratégies la sous stratégie TFE (Two Feet Egress) (Ait El Menceur et al., 2008a). Les instants caractéristiques sont :
 - ✓ Rotation du sujet sur le siège de 90° pour se mettre face à la portière.
 - ✓ Décollement des deux pieds du plancher.
 - ✓ Passage des pieds au dessous du bavolet.
 - ✓ Positionnement des deux pieds sur le sol.
 - ✓ Décollement du bassin du siège.
 - ✓ Passage de la tête au dessous du brancard.
 - ✓ Posture debout du sujet.

5.5 MODIFICATION DE LA STRUCTURE DU MODELE

Ce paragraphe rappelle les restrictions de l'étude qui ont conduit au modèle cinématique présenté dans ce mémoire. Puis, dans un second temps, une extension à la structure du modèle, ainsi que les difficultés inhérentes, sont présentées.

- Restrictions de l'étude
 - Les membres supérieurs ne sont pas considérés.
- La structure du modèle cinématique retenu dans l'étude

Le modèle cinématique tridimensionnel de l'être humain est composé de corps rigides et d'articulations de type rotoïde. Un corps de référence représente le bassin. Trois chaînes cinématiques simples connectées au bassin représentent les 2 membres inférieurs et la chaîne

réunissant le haut du tronc et la tête. Ce modèle est composé de 9 segments rigides représentant les 2 pieds, les 2 jambes, les 2 cuisses, la partie du tronc en dessous de la vertèbre lombaire L5 (5^{ème} lombaire), la partie du tronc au dessus de la vertèbre lombaire L5 et la tête.

- Extension de la structure du modèle

Pourquoi ?

La méthode d'adaptation des angles articulaires développée (Cf. § 3.3.7) a montré des limites pour positionner correctement le vertex. Il semble qu'une décomposition du tronc en 2 parties soit insuffisante. Lors du mouvement d'entrée les membres supérieurs ne sont que très rarement le siège d'inconfort, d'où leur absence dans le modèle retenu. Néanmoins, l'observation montre qu'ils participent activement à l'entrée dans un véhicule automobile (Chateauroux, 2009), et ceci d'autant plus si la personne est à mobilité réduite. Enfin, le modèle retenu a considéré le bassin comme corps de référence. Si peu de différences existent, Lempereur et al. (Lempereur et al., 2004) soulignent néanmoins l'importance de considérer le torse comme corps de référence lorsque le tronc est décomposé en 2 parties.

Perspective à court terme

L'extension vise à ajouter les membres supérieurs au modèle et à décomposer le tronc en un nombre suffisant de chaînons rigides. Le problème est alors de trouver principalement pour le tronc 1) le « bon » nombre de corps pour le représenter, 2) le lieu des articulations et 3) l'identité du corps de référence.

Dans ce mémoire, les membres inférieurs sont connectés au bassin, c'est-à-dire au corps de référence supposé. La décomposition du tronc en (plus de) 2 segments peut conduire à attacher ces membres à un corps autre que le corps de référence (retenu). Faire suivre alors aux pieds, mais aussi aux mains leurs trajectoires mesurées ou estimées demande de résoudre à nouveau un problème de cinématique inverse. Ce problème est néanmoins plus complexe car un corps (au moins) sépare le corps de référence des membres inférieurs ou supérieurs. Pour résoudre ce nouveau problème, il est possible de s'inspirer des travaux de Boulic et Baerlocher (Boulic et Baerlocher, 2001) Ces auteurs introduisent des niveaux de priorités sur les effecteurs des chaînes cinématiques.

Perspective à long terme

L'objectif vise à considérer l'être humain non plus comme un système multi-corps rigide sans volume, comme dans cette thèse, mais comme une structure volumique en déplacement. Si structure cinématique sans volume arrive à traverser un environnement encombré (ex. la distance entre le volant et le siège), qu'en sera-t-il pour la structure volumique (ex. personnes obèses) ?

Une première piste vise à affecter un volume à chaque solide constituant la structure cinématique de notre modèle. Le paramétrage de ces volumes peut être tiré par exemple des travaux menés par Dempster (Dempster, 1955), par Zatsiorsky et Seluyanov (Zatsiorsky et Seluyanov, 1983). La gestion des collisions pourra trouver des pistes en Conception Assistée par Ordinateur.

5.6 CONSTRUCTION DE DOMAINES DE PASSAGE PAR TYPE DE POPULATION

5.6.1 Contexte

La procédure de simulation proposée a visé la génération du mouvement d'entrée d'un sujet dans un véhicule automobile de géométrie variable. Les résultats ont montré l'existence de différences entre le mouvement simulé et mesuré. De premières perspectives ont été proposées afin que la simulation produise un mouvement plus représentatif du mouvement réellement réalisé par le sujet (Cf. § 5.2).

5.6.2 Problématique

Si une telle ambition est raisonnable, est-elle pour autant utile/nécessaire pour l'utilisateur final, c'est-à-dire le concepteur et/ou l'ergonome. Ne serait-il pas avantageux de proposer un domaine de passage représentatif du mouvement du sujet en tenant compte des différences intra- individuelles, voire de proposer des domaines de passage par type de population ou représentatif de X% d'un type de population (ex. les personnes âgées, les personnes souffrant de rhumatisme) (Cf. Fig. 5.3).

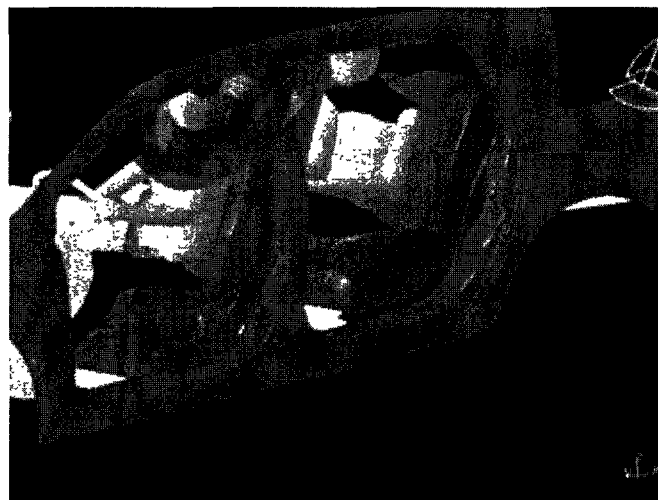


Figure 5 3. *Domaine de passage de la tête lors du mouvement de sortie (outil graphique RAMSIS).*

5.6.3 Perspective

La perspective vise à :

- Considérer plusieurs types de populations répartis en des groupes affinis : selon la stratégie adoptée, l'âge, la condition physique...
- De représenter la dispersion au sein de chaque groupe, en représentant les trajectoires des différents segments corporels sous forme de volume de passage (Cf. Fig. 5.2).
- De générer des domaines de passage significatifs de volume de passage.
- De rechercher les paramètres véhicule ou bien de la population (ex. anthropométrie, handicap...) qui influent sur la variation de ces volumes.

Pour satisfaire cette perspective, de nombreuses expérimentations devront être réalisés impliquant des sujets en nombre suffisant sur un véhicule permettant de tester plusieurs configurations.

5.7 PRISE EN COMPTE DE LA DYNAMIQUE

Ce paragraphe revient sur les restrictions qui ont conduit l'étude à ne s'intéresser qu'à la cinématique du mouvement d'entrée dans un véhicule automobile. La perspective vise à considérer sa dynamique.

- Restrictions de l'étude (Cf. § 2.2.1)
 - Les causes du mouvement (forces et couples articulaires) ne sont pas prises en considération.
- Prise en compte de la dynamique

Pourquoi ?

Les critères d'évaluation de l'inconfort présents dans la littérature sont le plus souvent cinématiques (Dufour et Wang, 2005). Ils peuvent considérer les limites articulaires et la déviation des articulations de leur position à l'intérieur de leur cône de mobilité (Verriest 2003). Pourtant, l'intégration de la dynamique dans l'élaboration des critères d'inconfort, comme Debril et al. (Debril et al., 2007) ont pu l'ébaucher, s'avère indispensable. En effet, par exemple la cinématique ne permet pas de conclure sur les raisons qui font qu'un sujet choisisse telle ou telle stratégie lorsque le critère retenu est dynamique (ex. l'équilibre dynamique).

Perspective 1 et difficultés

La démarche proposée dans ce mémoire pourrait être étendue à la dynamique du mouvement d'entrée dans un véhicule automobile. La première étape consistera à construire une base de mouvements « exploitables ». Celle-ci impose la mesure de la cinématique et de

la dynamique lors du mouvement d'entrée dans un véhicule automobile. Les mesures dynamiques demanderont en plus d'instrumenter l'habitacle. Le positionnement de capteurs (plates-formes) de force en des points stratégiques est donc à prévoir (ex. entrée, plancher, assise, dossier, volant).

→ Cette instrumentation a déjà débuté dans le cadre du projet HANDIMAN avec le positionnement de plates-formes de force à l'entrée et dans le plancher du véhicule (Ait El Menceur et al., 2007).

Tout comme dans ce travail, les angles articulaires doivent être calculés. Il faudra cependant estimer en plus les efforts inter segmentaires. Cela revient à résoudre un problème de dynamique inverse, ce qui consiste à déterminer les causes du mouvement (Vaughan et al., 1982). L'application de cette approche nécessite la mesure de la cinématique, des efforts externes et demande de disposer de modèles anthropométriques et inertiels des différents segments corporels afin d'estimer les efforts articulaires pour chaque articulation (Siegler, 1997).

→ De tels algorithmes sont déjà opérationnels et ont permis de mettre en évidence l'intérêt des données dynamiques dans l'évaluation de l'inconfort (Cf. Debril et al. (2007)). Dans le présent travail, les angles articulaires ont été adaptés par une procédure d'optimisation afin de réduire l'effet de déplacement des masses molles (Cf. § 3.7). De même, les efforts inter segmentaires seront adaptés afin de réduire l'effet des incertitudes liées à l'estimation de la masse et de l'inertie des segments corporels, de la position des centres de masse des segments (Allard et Blanchi, 2000). Une première idée consiste alors à résoudre un problème d'optimisation, comme dans ce mémoire, qui aboutirait à la détermination de nouveaux efforts inter segmentaires (adaptés) permettant de suivre la trajectoire (voire l'orientation) des pieds, du mains et du vertex (par exemple).

Une deuxième idée consiste à élaborer un (des) correcteur(s), par exemple, de type PID (Proportionnel Intégrateur Dérivé) dans un premier temps, permettant de corriger les forces et les moments articulaires de manière à restituer un mouvement cohérent (Cf. (Debril et al., 2008)). L'expression du PID permettant de calculer le moment est de la forme : $\tau = K_p(\theta - \theta_d) - K_d(\dot{\theta} - \dot{\theta}_d) - K_i \int (\theta - \theta_d) dt$ où τ est le moment qui permet au segment d'effectuer le mouvement, θ l'angle articulaire et θ_d l'angle articulaire désiré et K_p , K_d et K_i sont respectivement les constantes proportionnelle, de dérivation et d'intégration et elles sont à déterminer.

Des travaux dans la littérature sont déjà menés dans ce sens, citons par exemple (Bruderlin et Calvert, 1989; Raibert et Hodgins, 1991; Ko et Badler, 1996; Laszo et al., 1996) concernant le mouvement de marche, Multon (Multon, 1998) pour le mouvement du membre supérieur, Zordan et Hodgins (Zordan et Hodgins, 1999) pour le mouvement du haut du corps

ou encore ceux de (Hodgins et Wooten, 1998; Faloutsos et al., 2001) concernant les gestes sportifs.

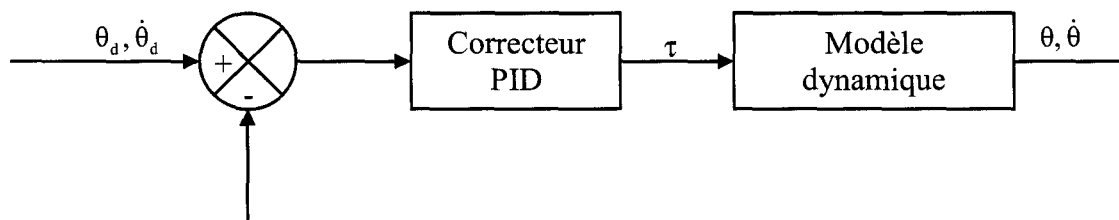


Figure 5 4. Contrôleur PID (Ménardais, 2003).

L'analyse du mouvement et la simulation d'une « partie » du mouvement à prédire d'entrée dans un véhicule constituent la 2^{ème} et 3^{ème} étape respectivement. La 2^{ème} étape consiste à analyser les différentes données (cinématiques et dynamiques) en vue de rechercher d'éventuels profils pour la simulation. La démarche méthodologique de quantification et classification des mouvements proposée dans la présente thèse pourrait être retenue pour quantifier et classifier les mouvements d'entrée d'un point de vue cinématique et dynamique (Cf. § 2.5). La simulation du mouvement peut alors s'inspirer des principes méthodologiques proposés dans l'architecture de contrôle de systèmes multi-chaînes développée par Gorce (Gorce, 1994) et éprouvée à plusieurs reprises sur différents mouvements tels que la marche sous perturbation (Gorce et al., 2001), l'enjambement d'obstacle (El Hafi et Gorce, 1999), la préhension (Gorce et al., 1994) et la manipulation (Gorce et Rezzoug, 2000). Le principe de cette méthode consiste à contrôler un corps de référence auquel sont reliées des chaînes cinématiques ouvertes simples indépendantes.

Des difficultés à cette première perspective existent. Par exemple, les expérimentations réalisées dans le cadre du projet HANDIMAN ont montré que malgré l'existence de 2 plates-formes de force disposés à l'entrée du véhicule, les sujets ont tendance à mettre les 2 pieds sur une même plate-forme. Par suite, quels sont les efforts à considérer pour le pied droit et pour le pied gauche ? Nous sommes face à une indétermination.

Perspective 2

Une autre piste est l'exploitation de plateformes logicielles dédiées à la simulation dynamique des mouvements humains. Nous pensons plus particulièrement à HuMANs (boîte à outils Scilab¹ (Wieber et Chevallereau, 2006) et Arboris² (boîte à outils Matlab, (Barthélémy et al., 2008)).

¹ <http://www.inrialpes.fr/bipop/software/humans/index.html>

² <https://vizir.robot.jussieu.fr/trac/arboris/wiki/Acc%C3%A9derAuCode>

- HuMANs pour « Humanoid Motion ANalysis and Simulation » est un simulateur par gestion d'événements. Il a été développé par l'INRIA depuis les travaux de doctorat de Wieber (Wieber, 2000).

- Arboris est un simulateur dynamique développé conjointement par le CEA-List et l'ISIR. Il permet de modéliser et de simuler plusieurs systèmes mécaniques poly-articulés en présence de multiples contacts non- permanents.

5.8 CONCLUSION

Le premier paragraphe de ce chapitre est revenu sur les principaux résultats de ce travail et a proposé de premières perspectives. La prise en compte des différences intra individuelles et la production de domaine de passage pourraient expliquer l'éloignement entre le mouvement simulé et le mouvement réellement produit par le sujet. Dans le cas contraire les hypothèses concernant l'interaction avec le véhicule automobile sont remises en question et imposent l'expérimentation sur un véhicule paramétrable.

D'autres perspectives sont ensuite développées, elles concernent :

- la fusion des travaux menés dans cette thèse et ceux de Lempereur (Lempereur, 2006) afin de simuler le mouvement d'un de taille sujet variable dans un véhicule de géométrie variable.
- la simulation du mouvement de sortie qui s'avère délicat chez la personne âgée et/ou à mobilité réduite,
- la modification de la structure du modèle de manière à tenir compte de l'implication des membres supérieurs et des mobilités du rachis.
- la construction de domaines de passage par type de population, voire pour X% du type de population retenue.
- la prise en compte de la dynamique dans l'optique de produire des critères d'évaluation de l'inconfort du mouvement simulé plus réaliste, mais aussi pour mieux comprendre les choix opérés par les sujets.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Afin d'intégrer la phase d'évaluation de l'inconfort du mouvement d'entrée-sortie des personnes âgées et/ou handicapées, dès les premières phases de la conception du véhicule automobile, les constructeurs automobiles se tournent vers l'usage de la simulation numérique. Malgré le nombre important de logiciels de mannequins numériques présents aujourd'hui sur le marché, ces derniers ne répondent pas encore à la problématique de la simulation du mouvement « complexe » d'entrée-sortie.

Le projet HANDIMAN (RNTS 2004) est l'un des rares projets à s'intéresser à la simulation de ce mouvement chez la population âgée et/ou ayant des prothèses de hanches et/ou genoux.

Le travail présenté dans cette thèse s'inscrivait dans le cadre de ce projet et visait à apporter des éléments de réponse aux problèmes de simulation relatif à ce mouvement complexe. En particulier, il se focalisait sur la simulation du mouvement d'entrée dans des véhicules automobiles à géométrie variable. La démarche proposée se positionne dans la continuité et la complémentarité des travaux initiés par Lempereur (Lempereur, 2006), dont l'objectif était la simulation du mouvement d'entrée d'une personne à anthropométrie variable dans un véhicule à géométrie fixe.

Un premier chapitre a présenté, au travers d'une revue de littérature, les différentes étapes conduisant à la simulation du mouvement d'accessibilité automobile à partir de données réelles.

Comme dit précédemment, les mannequins numériques semblaient l'outil le plus approprié pour simuler le mouvement d'accessibilité automobile. Pourtant, l'absence de bases de données représentatives des populations à mobilité réduite et d'algorithmes de simulation de mouvements complexes, comme le mouvement d'accessibilité au véhicule automobile, nous ont amenés à explorer plus en détail la littérature concernant ce mouvement.

Ce manque peut se justifier par le faible nombre d'études dédiées à cette thématique (moins de 20 articles à notre connaissance). Très peu d'études (moins de 5) abordent les personnes âgées et/ou ayant des déficiences motrices, et aucune parmi ces études ne propose de simuler ce mouvement. L'étude de ces quelques travaux a néanmoins été profitable car elle a permis d'orienter et d'affiner nos choix concernant la modélisation (ex. découpage du tronc en au moins 2 parties, la prise en compte de la tête), l'expérimentation (ex. l'utilisation d'un système de capture optoélectronique), l'analyse (ex. l'utilisation d'analyse statistique multifactorielle multivariable) et les méthodes de simulation (ex. « spacetime optimization »).

Au regard de cette revue de littérature, le deuxième chapitre a permis d'exposer la méthodologie mise en œuvre afin de simuler la cinématique du mouvement d'entrée d'un même sujet dans des véhicules à géométrie variable.

La méthodologie se développe en 3 étapes: 1) la construction d'une base de mouvements, 2) l'analyse et l'identification des stratégies du mouvement d'entrée et 3) le développement du simulateur permettant la simulation du mouvement d'entrée dans un véhicule automobile de taille variable.

La 2^{ème} étape tire son inspiration des travaux menés par Park et al. (Park et al., 2005) et Lempereur (Lempereur, 2006). Celle-ci procède en plusieurs phases. Une première classification est réalisée sur de nouveaux indices, nommés les 3BJCV, de laquelle les stratégies principales du mouvement sont extraites. Puis, une Analyse Factorielle en Composante Multiple (AFCM) est appliquée sur les angles articulaires centrés réduits afin d'en dégager les variables articulaires pertinentes. Enfin, une Classification Hiérarchique Ascendante (CHA) est appliquée aux mouvements des différents sujets en fonction des variables articulaires pertinentes identifiées, afin d'identifier les sous stratégies d'entrée dans un véhicule automobile.

La troisième phase nécessite un travail préliminaire, qui vise à définir les zones d'influence (zones d'interaction), les instants caractéristiques (instants d'interaction), les points caractéristiques (points anatomiques considérés lors des interactions) et le calcul des coordonnées des points caractéristiques dans les repères liés aux zones d'influence retenues.

La simulation suppose alors que les coordonnées des points caractéristiques dans le véhicule cible (choisi pour la simulation) sont identiques à celles calculées à partir des données expérimentales. Leurs trajectoires sont simulées à partir des trajectoires des points caractéristiques mesurées sur le véhicule expérimental. Le calcul des angles articulaires relève d'un problème de cinématique inverse, qui est résolu en formulant le problème comme un problème d'optimisation sous contraintes.

Le troisième chapitre a présenté les étapes nécessaires à la construction de la base de mouvements pour la simulation. Deux véhicules sont retenus : un « grand véhicule » (le monospace PEUGEOT 806) et un « petit véhicule » (le FORD Fiesta 1^{ère} génération). La capture des mouvements d'entrée est réalisée à l'aide du système optoélectronique de capture de mouvement tridimensionnel Vicon® 612. Les mouvements de 33 sujets sur le « petit véhicule » et ceux de 37 sujets sur le « grand véhicule » constituent les mouvements bruts exploitables en sortie d'expérimentation. Divers traitements leurs sont alors appliqués afin d'obtenir les données adaptées à l'application des méthodes décrites au chapitre 2.

Au terme de ce travail, la base de mouvements est constituée. Elle contient les coordonnées 3D des marqueurs apposés sur le sujet exprimés dans le repère véhicule et les

angles articulaires normalisés calculés selon les 2 modes de calculs nécessaires pour l'ensemble des mouvements d'entrée exploitables. Les méthodes proposées peuvent être appliquées.

Le quatrième chapitre a présenté les résultats obtenus avec la démarche méthodologique proposée dans le cadre de ce mémoire pour simuler la cinématique du mouvement d'entrée dans un véhicule automobile pour un même sujet.

La première partie de ce chapitre a présenté les résultats de l'analyse et l'identification des stratégies motrices d'entrée dans un véhicule automobile.

Deux stratégies (à « 1 pied » et à « 2 pieds ») et 6 sous stratégies (LS, BM, FM, TB, TF et MM) ont été identifiées par l'approche automatique développée. Cette approche se révèle précise. Par ailleurs, son utilisation ne demande aucune expertise et ne souffre donc pas des problèmes liés à la reproductibilité et à la répétabilité inhérente à l'observation. Enfin, l'approche proposée offre l'avantage de classer les sujets en fonction de données quantitatives (des variables articulaires, par ailleurs discriminantes), données utilisées à l'étape visant la simulation du mouvement.

La deuxième partie de ce chapitre a présenté les résultats de simulation. Quatre exemples sont traités, de la simple vérification à l'utilisation du simulateur comme outil d'aide à l'interprétation des changements de stratégie observée. Pour les 3 premiers exemples, la stratégie d'entrée adoptée par le sujet dans le « Véhicule Simulation » est identique à celle adoptée sur le « Véhicule Expérimental ». Les mouvements simulés sont validés vis-à-vis des stratégies retenues pour la simulation. La sous- stratégie retenue pour la simulation dans le quatrième exemple sur le « Véhicule Simulation » n'est pas adoptée par le sujet retenu en réalité. Cette simulation « échouée » et un petit travail concernant la robustesse du simulateur a montré l'intérêt d'un tel simulateur pour prédire les changements de stratégie.

Le cinquième chapitre est revenu sur les principaux résultats de ce travail et a proposé de premières perspectives. La prise en compte des différences intra individuelles et la création de domaine de passage (et non plus seulement de trajectoire imposée) pourraient expliquer l'éloignement entre le mouvement simulé et le mouvement réellement produit par le sujet. Dans le cas contraire les hypothèses concernant l'interaction avec le véhicule automobile sont remises en question et imposent l'expérimentation sur un véhicule paramétrable.

D'autres perspectives sont ensuite développées, elles concernent :

- la fusion des travaux menés dans cette thèse et ceux de Lempereur (Lempereur, 2006) afin de simuler le mouvement d'un de taille sujet variable dans un véhicule de géométrie variable.

- la simulation du mouvement de sortie qui s'avère délicat chez la personne âgée et/ou à mobilité réduite,
- la modification de la structure du modèle de manière à tenir compte de l'implication des membres supérieurs et des mobilités du rachis.
- la construction de domaines de passage par type de population, voire pour X% du type de population retenue.
- la prise en compte de la dynamique dans l'optique de produire des critères d'évaluation de l'inconfort du mouvement simulé plus réaliste, mais aussi pour mieux comprendre les choix opérés par les sujets.

BIBLIOGRAPHIE PERSONNELLE

BIBLIOGRAPHIE PERSONNELLE

Revues internationales avec comité de lecture

- 1- Pudlo P., Ait El Menceur M-O., Gorce P., Lepoutre F-X. (2009). A method for simulating the car-entering movement for variably-dimensioned vehicles. *International Journal of Vehicle design*, (Acceptée le 04/09/2009) ISSN: 0143-3369.
- 2- Ait El Menceur M-O., Pudlo P., Gorce P., Lepoutre F-X (2009). An Automatic procedure to identify Alternative Movement Identification in the Automobile Ingress for Young and Elderly Population with or without Prostheses. *International Journal of Industrial Ergonomics*, (Accepté le 04/08/2009), ISSN 0169-8141.
- 3- Ait El Menceur M-O., Pudlo P., Debril J-F., Gorce P., Lepoutre F-X (2009). An Automatic Method to Identify Human Alternative Movements: Application to the Ingress Movement. *Journal of Automation, Mobile Robotics and Intelligent Systems*, Vol.3, n°3, pp. 64-69. ISSN 1897-8649.
- 4- Ait El Menceur M-O., Pudlo P., Gorce P., Thévenon A., Lepoutre F-X (2008). Alternative Movement Identification in the Automobile Ingress and Egress for Young and Elderly Population with or without Prostheses. *International Journal of Industrial Ergonomics*, pp. 1078-1087, Volume 38, Issues 11-12, ISSN 0169-8141.
- 5- Debril J-F., Pudlo P., Ait El Menceur M-O., Gorce P., Lepoutre F-X. (2007). Human articulation efforts estimation in the automobile vehicle accessibility movement - A pilot study. *Lecture Notes in Computer Science (LNCS)*, 4561, pp. 23-32, ISSN 0302-9743.

Conférences internationales avec comité de lecture et publication d'actes

- 1- Ait El Menceur M-O., Pudlo P., Gorce P., Lepoutre F-X. (2008). An optimization procedure to reconstruct the automobile ingress movement. *IEEE, IFAC, 5th International Conference On Informatics in Control, Automation and Robotics ICINCO* (2008), Funchal, Madeira- Portugal 11-15 May. ISBN : 978-989-8111-35-7.
- 2- Ait El Menceur M-O., Pudlo P., Debril J-F., Gorce P., Lepoutre F-X (2008). An Automatic Method to Identify Human Alternative Movements: Application to the Ingress Movement. *9th IFAC Workshop on Intelligent Manufacturing Systems*. Szczecin-Poland, October 09-10 2008.
- 3- Debril J-F., Ait El Menceur M.O., Pudlo P., Lepoutre F.X., Gorce P. (2007). Articular efforts developed by a disabled subject during the automobile vehicle accessibility movement - A discomfort index?. *Digital Human Modeling for Design and Engineering Conference*, Seattle, Washington, USA, juin.

- 4- Leroy L., Bleuse S., **Ait El Menceur M-O.**, Urzica I., Depecker T., Pudlo P., Thévenon A. (2007). Locomotor capacity and car accessibility after 65 years. *The 4th World Congress of the International Society of Physical and Rehabilitation Medicine*, Seoul, Korea, juin.
- 5- **Ait El Menceur M-O.**, Pudlo P., Gorce P., Lepoutre F-X. (2007). Automobile vehicle ingress/egress movement strategies adopted by elderly and/or, hip or knee, prosthesis having persons. *10th IFAC/IFIP/IFORS/IEA Symposium on Analysis, Design, and Evaluation of Human-Machine Systems*, Seoul, Korea, septembre. ISBN: 978-3-902661-37-1
- 6- Chateauroux E., Wang X., Pudlo P., **Ait El Menceur M-O.** (2007). Evaluation suggestive des difficultés des personnes âgées ou déficientes motrices lors d'un mouvement d'entrée et de sortie d'un véhicule. *11ème Conférence internationale sur la mobilité et le transport des personnes âgées ou à mobilité réduite*, Montréal, Canada, juin.
- 7- **Ait El Menceur M-O.**, Pudlo P., Découfour N., Bassement M., Gillet C., Chateauroux E., Gorce P., Lepoutre F-X. (2007). Towards dynamic studying of the car ingress/egress movement for elderly and disabled population. *IEEE HUMAN'07, Human Machine iNteraction Conference*, Timimoun, Algeria, mars.
- 8- **Ait El Menceur M-O.**, Pudlo P., Découfour N., Bassement M., Gillet C., Chateauroux E., Gorce P., Lepoutre F-X. (2006). An experimental protocol to study the car ingress/egress movement for elderly and pathological population. *European Annual Conference on Human Decision-Making and Manual Control*, Valenciennes, septembre, ISBN 2-905725-87-7.

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

Abdel-Malek, K., Yang, J., Marler, T., Beck, S., Mathai, A., Zhou, X., Patrick, A., Arora, J. (2006). Towards a new generation of virtual humans. *International Journal of Human Factors Modelling and Simulation* 1: 2-39.

Adams, D. C., Cerney, M. M. (2007). Quantifying biomechanical motion using Procrustes motion analysis. *Journal of Biomechanics* 40(2): 437-444.

Ait El Menceur, M.-O., Pudlo, P., Découfour, N., Bassement, M., Gillet, C., Chateauroux, E., Gorce, P., Lepoutre, F.-X. (2006). An experimental protocol to study the car ingress/egress movement for elderly and pathological population. In *European Annual Conference on Human Decision-Making and Manual Control, EAM 06, Valenciennes, France*. Septembre.

Ait El Menceur, M.-O., Pudlo, P., Découfour, N., Bassement, M., Gillet, C., Chateauroux, E., Gorce, P., Lepoutre, F.-X. (2007). Towards dynamic studying of the car ingress/egress movement for elderly and disabled population. In *IEEE HUMAN'07, Human Machine iInteraction Conference*, pp. 350-355. Timimoun, Algeria. Mars.

Ait El Menceur, M. O., Pudlo, P., Gorce, P., Thévenon, A., Lepoutre, F.-X. (2008a). Alternative movement identification in the automobile ingress and egress for young and elderly population with or without prostheses. *International Journal of Industrial Ergonomics* 38(11-12): 1078-1087.

Ait El Menceur, M. O., Pudlo, P., Lepoutre, F. X., Gorce, P. (2008b). An optimization procedure to reconstruct the automobile ingress movement. In *ICINCO 2008 - Proceedings of the 5th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics*, pp. 165-168. Inst. for Syst. and Technol. of Inf. Control and Commun., Funchal, Madeira, Portugal.

Alexander, E. J., Andriacchi, T. P. (2001). Correcting for deformation in skin-based marker systems. *Journal of Biomechanics* 34(3): 355-361.

Allard, P., Blanchi, J. P. (2000). *Analyse du mouvement humain par la biomécanique*, Décarie Editeur edition., ISBN: 2891371593.

Ambrose, D. H., Cole, G. P., Gallagher, S. (2004). Estimating Low Back Loads of Underground Mine Roof Bolter Operators using Digital Human Simulations. In *SAE International conference and exposition of Digital Human Modelling for Design and Engineering*, 2004-01-2148.

Andreoni, G., Rabuffetti, M., Pedotti, A. (1997). New approaches to car ergonomics evaluation oriented to virtual prototyping. In *EURO-BME Course on Methods & Technologies for the Study of Human Activity & Behaviour*.

Andreoni, G., Rabuffetti, M., Pedotti, A. (2004). Technical note: Kinematics of head-trunk movements while entering and exiting a car. *Ergonomics* 47(3): 343-359.

Andreoni, G., Santambrogio, G. C., Rabuffetti, M., Pedotti, A. (2002). Method for the analysis of posture and interface pressure of car drivers. *Applied Ergonomics* 33(6): 511-522.

- Arjmand, N., Shirazi-Adl, A.** (2006). Model and in vivo studies on human trunk load partitioning and stability in isometric forward flexions. *Journal of Biomechanics* **39**(3): 510-521.
- Arlt, F., Marach, A.** (1998). CAD modelling of a human 3D child body. *International Journal of Industrial Ergonomics* **22**(4-5): 333–341-333–341.
- Assiante, C.** (1996). La construction des stratégies d'équilibre chez l'enfant au cours d'activités posturocinétiques. *Ann Réadaptation Méd Phys* **41**: 239-249.
- Backstrand, G., Hogberg, D., De Vin, L. J., Case, K., Piamonte, P.** (2007). Ergonomics analysis in a virtual environment. *International Journal of Manufacturing Research* **2**(Volume 2, Number 2 / 2007): 198-208.
- Badler, N., Phillips, C., Webber, B.** (1993). *Simulating Humans: Computer Graphics Animation and Control*. In Oxford University Press, , New York.
- Baerlocher, P.** (2001). *Inverse Kinematics Techniques For the Interactive Posture Control of Articulated Figures*. Ecole Polytechnique Federale de Lausanne.
- Baillieul, J.** (1986). Avoiding obstacles and resolving kinematic redundancy. In 198 Int. Conf. On Robotics and Automation. April.
- Bapu, P., Evans, S., Kitka, P., Korna, M., McDaniel, J.** (1981). User's guide for COMBIMAN programs. In, Univ. of Dayton Research Institute, U.S.A.F. Rep. Technical Report AFAMRL-TR-80-91.
- Barbier, F.** (1994). *Modélisation biomécanique du corps humain et analyse de la marche normale et pathologique: application à la rééducation*. Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis.
- Barin, K.** (1989). Evaluation of generalized model of human postural dynamics and control in the sagittal plane *Biological cybernetics* **61**: 37-50.
- Barthélémy, S., Bidaud, P., Micaelli, A., Bru, B.** (2008). Arboris : Un logiciel pour le synthèse de comportements de mannequins virtuels,. In JNRH 2008, Aéroclub de France, PARIS.
- Begon, M.** (2006). *Analyse et simulation tridimensionnelle de mouvements cycliques sur un ergomètre spécifique au kayak*. Université de Poitiers.
- Bell, A. L., Pedersen, D. R., Brand, R. A.** (1990). A comparison of the accuracy of several hip center location prediction methods. *Journal of Biomechanics* **23**(6): 617-621.
- Bendahan, P.** (2006). *Analyse Biomécanique et Simulation du Mouvement de Préhension en Milieu Encombré*. Université d'Orsay-Paris Sud.
- Besson, D.** (1999). *Modélisation ergonomique cinématique directe et inverse du dos et du cou a partir de marqueurs externes*. Université Claude Bernard (Lyon 1).
- Blakeley, F. M.** (1980). *CYBERMAN*. In, Chrysler Corp, Detroit, Michigan.

- Boulic, R., Baerlocher, P.** (2001). Cinématique inverse pour personnage 3D: solutions analytiques et variationnelles. *Revue internationale de CFAO* **16**(1): 83-99.
- Boulic, R., Mas, R., Thalmann, D.** (1996). A robust approach for the control of the center of mass with inverse kinetics. *Mobile Computing* **20**(5): 693-701.
- Brodeur, R. R.** (2004). Porting CAESAR data as an ERL human body model. In *SAE International conference and exposition of Digital Human Modelling for Design and Engineering*.
- Bruderlin, A., Calvert, T.** (1989). Goal-directed, dynamic animation of human walking. In *International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, pp. 233-242. Boston, Massachusetts, USA. July 31 - August 4.
- Bruderlin, A., Williams, L.** (1995). Motion signal processing. In *SIGGRAPH'97*, pp. 97-104. Los Angeles, California, USA, August 6-11,.
- Brutel, C.** (2002). La population de la France métropolitaine en 2050 : un vieillissement inéluctable *Economie et Statistique* (355-356): 57-71.
- Burgess-Limerick, R., Abernethy, B.** (1997). Qualitatively different modes of manual lifting. *International Journal of Industrial Ergonomics* **19**(5): 413-417.
- Bush, T. R., Gutowski, P. E.** (2003). An approach for hip joint center calculation for use in seated postures. *Journal of Biomechanics* **36**(11): 1739-1743.
- Calais-Germain, B.** (1984). Anatomie pour le mouvement. Tome 1: Introduction à l'analyse des techniques corporelles. ISBN: 2-9500608-3-8.
- Camomilla, V., Cereatti, A., Vannozzi, G., Cappozzo, A.** (2006). An optimized protocol for hip joint centre determination using the functional method. *Journal of Biomechanics* **39**(6): 1096-1106.
- Cappelaere, A., Thévenon, A., Delcambre, B.** (1991). Polyarthrite rhumatoïde et conduite automobile : Essais contrôlés d'un véhicule de série *Ann. Réadaptation Méd. Phys* **34**: 239-244.
- Cappozzo, A., Catani, F., Della Croce, U., Leardini, A.** (1995). Position and orientation in space of bones during movement: anatomical frame definition and determination. *Clinical Biomechanics* **10**(4): 171-178.
- Cappozzo, A., Catani, F., Leardini, A., Benedetti, M. G., Della Croce, U.** (1996). Position and orientation in space of bones during movement: experimental artefacts. *Clinical Biomechanics* **11**(2): 90-100.
- Caputo, F., Gironimo, G., Monacelli, G., Sessa, F.** (2001). The design of a virtual environment for ergonomic studies. In *XII ADM International Conference Grand Hotel - Rimini - Italy*. Sept. 5th-7th, 2001.
- Cerveri, P., Pedotti, A., Ferrigno, G.** (2005). Kinematical models to reduce the effect of skin artifacts on marker-based human motion estimation. *Journal of Biomechanics* **38**(11): 2228-2236.

Chaffin, D. B. (2001). Digital Human modeling for vehicle and workplace design. In Society of Automotive Engineers Inc.

Chaffin, D. B. (2005). Improving digital human modelling for proactive ergonomics in design. *Ergonomics* **48**(5): 478-491.

Chaffin, D. B., Faraway, J., Zhang, X. (1999). Simulating Reach Motions. In SAE International conference and exposition of Digital Human Modelling for Design and Engineering.

Chateauroux, E. (2009). Analyse du mouvement d'accessibilité au poste de conduite d'une automobile en vue de la simulation - Cas particulier des personnes âgées. Institut national des sciences appliquées de Lyon.

Chedmail, P., Maille, B., Ramstein, E. (2002). Accessibility and ergonomics study with virtual reality, a state of the art. *Mécanique & Industries* **3**: 147-152.

Cherednichenko, A., Assmann, E., Bubb, H. (2006). Computational Approach for Entry Simulation. In SAE International conference and exposition of Digital Human Modelling for Design and Engineering, 2006-01-2358.

Chevallereau, C., Khalil, W. (1988). A new method for the solution of the inverse kinematics of redundant robots. In Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 37-42.

Chevriau, S., Grun, C., Chitescu, C., Gomes, S. (2003). Re-conception d'un mannequin numérique pour l'analyse et la conception de l'activité gestuelle, posturale et visuelle. In 10^{ième} Séminaire CONFERE, pp. 351-359. Belfort – France. 3-4 Juillet 2003.

Cheze, L. (1993). Contribution à l'étude cinématique et dynamique un vivo de structures osseuses humaines par l'exploitation des données externes Université Claude Bernard- Lyon 1.

Chèze, L., Gutierrez, C., Marcelino, R. S., Dimnet, J. (1996). Biomechanics of the upper limb using robotic techniques. *Human Movement Science* **15**(3): 477-496.

Chin, K. W. (1996). Closed_Form and Generalized Inverse Kinematic Solutions for Animating the Human Articulated Structure. Curtin University of Technology, Australia.

Cohen, M. F. (1992). Interactive Spacetime Control for Animation. In Siggraph'92, pp. 293-302.

Davis, R. B., Öunpuu, S., Tyburski, D., Gage, J. R. (1991). A gait analysis data collection and reduction technique. *Human Movement Science* **10**(5): 575-587.

Debril, J.-F., Pudlo, P., Ait El Menceur, M. O., Gorce, P., Lepoutre, F. X. (2007). Human articulation efforts estimation in the automobile vehicle accessibility movement - A pilot study. In Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics), pp. 23–32. Springer Verlag, Beijing, China.

- Debril, J.-F., Pudlo, P., Gorce, P., Lepoutre, F.-X.** (2008). Joint moment determination for ergonomic simulation of reaching movement: PID controllers contribution. In XXXIII Congrès de la Société de Biomécanique, Compiègne, France. Septembre.
- Delerba, F.** (2001). Modélisation géométrique et mécanique tridimensionnelle du rachis thoracique et lombaire en configuration de choc automobile. Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers - Centre de Paris.
- DelVecchio, D., Murray, R. M., Perona, P.** (2003). Decomposition of human motion into dynamics-based primitives with application to drawing tasks. *Automatica* **39**(12): 2085-2098.
- Demirel, H. O., Duffy, V. G.** (2007). Digital human modeling for product lifecycle management. In *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, pp. 372-381. Beijing, China.
- Dempster, W. T.** (1955). Space requirements of the seated operator. In, pp. 55-159. WADC Technical Report, Wright-Patterson Air Force Base, Ohio.
- Denavit, J., Hartenberg, R. S.** (1955). A kinematic notation for lower pair mechanism based on matrices. *Journal of Applied Mechanics* **22**: 215-221.
- Du, J., Duffy, V. G.** (2007). A methodology for assessing industrial workstations using optical motion capture integrated with digital human models. *Occupational Ergonomics* **7**: 11-25.
- Duffy, V. G.** (2005). Digital human modeling for applied ergonomics and human factors engineering. In *Proceedings of CybErg 2005. The Fourth International Cyberspace Conference on Ergonomics.*, International Ergonomics Association Press, Johannesburg.
- Dufour, F., Wang, X.** (2005). Discomfort assessment of car ingress/egress motions using the concept of neutral movement. *SAE transactions* **114**(6): 2905-2913.
- El Hafi, F.** (2000). Modélisation dynamique du mouvement: application à la marche et à l'enjambement d'obstacle. Université Paris XII Val de Marne.
- El Hafi, F., Gorce, P.** (1999). Behavioural approach for a bipedal robot stepping motion gait. *Robotica* **17**(5): 491-501.
- Faloutsos, P., van de Panne, M., Terzopoulos, D.** (2001). The virtual stuntman: dynamic characters with a repertoire of autonomous motor skills. *Computers & Graphics* **25**(6): 933-953.
- Faraway, J.** (2000). Modeling reach motions using functional regression analysis.
- Faraway, J. J.** (1997). Modeling Hand Trajectories During Reaching Motion.
- Faraway, J. J., Zhang, X., Chaffin, D. B.** (1999). Rectifying postures reconstructed from joint angles to meet constraints. *Journal of Biomechanics* **32**(7): 733-736.
- Farrell, K., Marler, T., Abdel-Malek, K.** (2005). Modeling Dual-Arm Coordination for posture: An optimisation-Based Approach. In *SAE International 2005-01-2686*.

Fontana, M., Rizzi, C., Cugini, U. (2006). A CAD-oriented cloth simulation system with stable and efficient ODE solution. *Computers & Graphics* **30**(3): 391-406.

Fortin, C., Gilbert, R., Beuter, A., Laurent, F., Schiettekatte, J., Carrier, R., Dechamplain, B. (1990). SAFEWORK: A microcomputer-aided workstation design and analysis. New advances and future developments. In *Computer-Aided Ergonomics*, in Karwowski W., Genaidy A.M. and Asfour S.S. (Eds) (L. TAYLOR & FRANCIS editor), pp. 157-180.

Fournier, A. (1980). Génération de mouvements en robotique; application des inverses généralisées et des pseudo-inverses. Université de Montpellier.

Fradet, L. (2003). Analyse Biomécanique, Modélisation et Simulation du Tir au Handball. Université de Rennes 2.

Freeman, R., Haslegrave, C. M. (2004). The Determination of Optimal Pedal Positioning for Automobiles Using Jack. SAE International conference and exposition of Digital Human Modelling for Design and Engineering,2004-01-2149.

Frigo, C., Carabalona, R., Dalla Mura, M., Negrini, S. (2003). The upper body segmental movements during walking by young females. *Clinical Biomechanics* **18**: 419-425.

Fritz, L., Pewiniski, W., Sadek, J. (2003). Obtaining a Representative Occupant Load Path for Sliding Ingress Egress Testing.

Gamage, S. S. H. U., Lasenby, J. (2002). New least squares solutions for estimating the average centre of rotation and the axis of rotation. *Journal of Biomechanics* **35**(1): 87-93.

Giacomin, J., Quattrocolo, S. (1997). An analysis of human comfort when entering and exiting the rear seat of an automobile. *Applied Ergonomics* **28**(5-6): 397-406.

Gilad, I., Tichauer, E. R. (1999). Spinal geometry during lifting tasks. *International Journal of Industrial Ergonomics* **23**: 307-318.

Gillet, C. (2004). Analyse biomécanique de la marche et proposition de classes de marcheurs -application au portage de sacs à dos. Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis.

Gleicher, M. (1998). Retargetting motion to new characters. In *Proceedings of the ACM SIGGRAPH Conference on Computer Graphics*, pp. 33-42. ACM, Orlando, FL, USA.

Gleicher, M. (2001). Comparing constraint-based motion editing methods. *Graphical Models* **63**(2): 107-134.

Godillon, A. P. (1991). Modélisation géométrique et cinématique 3D du rachis scoliothique pour la réalisation d'un outil d'aide au médecin. Université de Valenciennes et de Hainaut-Cambrésis.

Gorce, P. (1994). Méthodologie de conception de système de préhension polyvalent. Thèse de doctorat. Université Pierre et Marie Curie, Paris 6.

- Gorce, P.** (1999). A cybernetical method for simulating the dynamic erect stance posture control under perturbation. *The International Journal of Systems & Cybernetics, Kybernetes*, MCB University Press Limited **28**(9): 1042-1053.
- Gorce, P.** (2000). Approche biomécanique et robotique du mouvement chez l'homme. Habilitation à Diriger les Recherches. Université Paris Sud.
- Gorce, P., El Hafi, F., Lopez Coronado, J.** (2001). Dynamic control of walking cycle with initiation process for humanoïd robot. *Journal of Intelligent and Robotic Systems* **31**: 321-337.
- Gorce, P., Rezzoug, N.** (2000). Numerical method applied to object tumbling with multi-body systems. *Computational Mechanics* **24**(6): 426-434.
- Gorce, P., Vanel, O.** (1997). Behaviour synthesis of the erect stance for a biped control. *Journal of Intelligent and Robotic Systems: Theory and Applications* **18**(2): 127-145.
- Gorce, P., Vanel, O., Ribreau, C.** (1995). Equilibrium study of Human robot. In *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, pp. 1309-1314. Vancouver, Canada. 22-25 October.
- Gorce, P., Villard, C., Fontaine, J. G.** (1994). Grasping, coordination and optimal force distribution in multifingered mechanisms. *Robotica* **12**(pt 3): 243-251.
- Gorton, G., Hebert, D., Goode, B.** (2001). Assessment of the kinematic variability between 12 shiners motion analysis laboratories. In *6th Annual Meeting of the Gait and Clinical Movement Analysis Society*, Sacramento, California, USA. April 25-28.
- Gransitzki, K.** (1994). Biomechanics of entering a car. In *Second International Congress on Physiological Anthropology*, pp. 12-16. University of Kiel, Germany.
- Grood, E. S., Suntay, W. J.** (1983). A joint coordinate system for the clinical description of the threedimensional motions: applications to the knee. *Journal of Biomechanical Engineering* **105**: 136-144.
- Guimaraes, C. P., Pastura, F. C. H., Zamberlan, M. C. P. L., Cid, G. L.** (2004). A Proposal for Integrating Brazilian Anthropometric Database(Ergokit) Within a Biomechanical System Based on Video Cinematography(Biomec). In *SAE International conference and exposition of Digital Human Modelling for Design and Engineering*.
- Gyi, D. E., Porter, J. M., Robertson, N. K.** (1998). Seat pressure measurement technologies: considerations for their evaluation. *Applied Ergonomics* **29**(2): 85-91.
- Halvorsen, K., Lesser, M., Lundberg, A.** (1999). A new method for estimating the axis of rotation and the center of rotation. *Journal of Biomechanics* **32**(11): 1221-1227.
- Hanson, L., Akselsson, R., Andreoni, G., Rigotti, C., Palm, R., Wienholt, W., Costa, M., Lundin, A., Rizzuto, F., Gaia, E., others** (1999). ANNIE, a Tool for Integrating Ergonomics in the Design of Car Interiors. In *SAE CONFERENCE PROCEEDINGS P*, pp. 79-89.

Hanson, L., Blomé, M., Dukic, T., Högberg, D. (2006). Guide and documentation system to support digital human modeling applications. *International Journal of Industrial Ergonomics* **36**(1): 17-24.

Hanson, L., Yong, L., Falkmer, T. (2007). Human age and vehicle speeds affect on vehicle ingress motion pattern. In *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, pp. 843-846. Beijing, China.

Hatze, H. (1984). Quantitative analysis, synthesis and optimization of human motion. *Human Movement Science* **3**: 5-25.

Havasi, L., Szilávik, Z., Szirányi, T. (2006). Higher order symmetry for non-linear classification of human walk detection. *Pattern Recognition Letters* **27**(7): 822-829.

Herda, L., Fua, P., Plänkner, R., Boulic, R., Thalmann, D. (2001). Using skeleton-based tracking to increase the reliability of optical motion capture. *Human Movement Science* **20**(3): 313-341.

Hodgins, J. K., Wooten, W. L. (1998). Animating human athletics. In *In Robotics Research: The Eighth International Symposium*. Y. Shirai and S. Hirose (eds), pp. 356-367. Springer-Verlag, Berlin.

Julliard, F. (2001). Spécification Réactive pour l'Animation de Personnages Articulés. Université de Paris XI.

Kapandji, I. A. (1974). Physiologie articulaire, fascicule II, membre inférieur. Librairie Maloine S.A., Paris, ISBN: 2-224-01052-4.

Kapandji, I. A. (1975). Physiologie articulaire, fascicule III, tronc et rachis. Librairie Maloine S.A., Paris, ISBN: 2-224-00009-X.

Karabinova Makki, E. (1999). Modélisation du membre inférieur à des fins ergonomiques par l'exploitation des trajectoires de marqueurs externe. Université de Claude Bernard - Lyon I.

Kawachi, K., Aoki, K., Mochimaru, M. (2005). Visualization and Classification of Strategy for Entering Car.

Kawachi, K., Aoki, K., Mochimaru, M., Kouchi, M. (2007). Motion Distribution Map of Ingress to Driver's Seats. In *SAE International conference and exposition of Digital Human Modelling for Design and Engineering*, 2007-01-2506.

Khalil, W., Dombre, E. (1999). Modélisation, identification et commandes des robots. Hermes, ISBN: 2-7462-0003-1.

Klein, C. A., Huang, C. S. (1983). Review of pseudo-inverse control for use with kinematically redundant manipulators. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, **13**(2): 245-250.

- Ko, H., Badler, N.** (1996). Animating human locomotion in real-time using inverse dynamics, balance and comfort control. *IEEE Computer Graphics and Applications* **16**(2): 50-59.
- Kochanek, D. H. U., Bartels, R. H.** (1984). Interpolating Splines with Local Tension, Continuity and bias Tension. In *SIGGRAPH'84*, pp. 33-41. Minneapolis, Minnesota, USA. July 23-27.
- Kolich, M.** (2003). Automobile seat comfort: occupant preferences vs. anthropometric accommodation. *Applied Ergonomics* **34**(2): 177-184.
- Korein, J.** (1985). A geometric investigation of reach. University of Pennsylvania.
- Kouchi, M., Mochimaru, M., Higuchi, M.** (2004). A validation method for digital human anthropometry: Towards the standardization of validation and verification. *SAE transactions* **113**(1): 254-259.
- Kreighbaum, E., Barthels, K. M.** (1990). *Biomechanics: A qualitative approach for studying human movement*. Macmillan Publishing Company. ISBN: 0023663103.
- Kuo, A. D.** (1995). An Optimal Control Model for Analysing Human Postural Balance. *IEEE Transactions of Biomedical Engineering* **42**(1): 87-101.
- Kuo, C.-F., Chu, C.-H.** (2005). An online ergonomic evaluator for 3D product design. *Computers in Industry* **56**(5): 479-492.
- Lakany, H.** (2008). Extracting a diagnostic gait signature. *Pattern Recognition* **41**(5): 1627-1637.
- Laszo, J., van de Panne, M., Fiume, E.** (1996). Limit cycle control and its application to the animation of balancing and walking. In *International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, pp. 155-162. New Orleans, Louisiana, USA. August 4-9.
- Leardini, A., Cappozzo, A., Catani, F., Toksvig-Larsen, S., Petitto, A., Sforza, V., Cassanelli, G., Giannini, S.** (1999). Validation of a functional method for the estimation of hip joint centre location. *Journal of Biomechanics* **32**(1): 99-103.
- Leardini, A., Chiari, L., Croce, U. D., Cappozzo, A.** (2005). Human movement analysis using stereophotogrammetry: Part 3. Soft tissue artifact assessment and compensation. *Gait & Posture* **21**(2): 212-225.
- Lee, J., Shin, S. Y.** (1999). A hierarchical approach to interactive motion editing for human-like figures. In *SIGGRAPH '99: Proceedings of the 26th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pp. 39-48. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., New York, NY, USA.
- Lee, Y. H., Chiou, W. K., Chen, W. J., Lee, M. Y., Lin, Y. H.** (1995). Predictive model of intersegmental mobility of lumbar spine in the sagittal plane from skin markers. *Clinical Biomechanics* **10**(8): 413-420.
- Lempereur, M.** (2006). *Simulation du Mouvement d'Entrée dans un Véhicule Automobile*. Université de Valenciennes et du Hainaut- Cambrésis.

Lempereur, M., Pudlo, P., Gorce, P., Lepoutre, F.-X. (2003). Optimization approach for the simulation of car accessibility movement. In IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, Washington D-C, USA. October 5-8.

Lempereur, M., Pudlo, P., Gorce, P., Lepoutre, F.-X. (2004). Mannequin virtuel adapté à la simulation du mouvement d'entrée-sortie au véhicule automobile. *Journal Européen des Systèmes Automatisés* **38**(7-8): 959-976.

Lempereur, M., Pudlo P., Gorce, P. and Lepoutre, F-X. (2005). Identification of alternative movement techniques during the ingress movement. Proc. of the IEEE International Conference on Systems Man and Cybernetics, Hawaii, USA, octobre.

Lepoutre, F.-X. (1993). Human posture modelisation as a problem of inverse kinematic of redundant robots. *Robotica* **11**: 339-343.

Lestrelin, D., Trasbot, J. (2005). The REAL MAN Project: Objectives, Results and Possible Follow-up. In SAE International conference and exposition of Digital Human Modelling for Design and Engineering, 2005-01-2682.

Li, K., Duffy, V. G., Zheng, L. (2006). Universal accessibility assessments through virtual interactive design. *International Journal of Human Factors Modelling and Simulation* **1**: 52-68.

Liegeois, A. (1977). Automatic Supervisory control of the configuration and behavior of multibody mechanisms. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics* **7**: 868-871.

Lim, S., Martin, B. J., Chung, M. K. (2004). The effects of target location on temporal coordination of the upper body during 3D seated reaches considering the range of motion. *International Journal of Industrial Ergonomics* **34**(5): 395-405.

Lister, S. J., Jones, N. B., Spurgeon, S. K., Scott, J. J. A. (2006). Simulation of human gait and associated muscle activation strategies using sliding-mode control techniques. *Simulation Modelling Practice and Theory* **14**(5): 586-596.

Liu, G., McMillan, L. (2006). Estimation of missing markers in human motion capture. *Visual Computer* **22**(9-11): 721-728.

Liu, Y.-C. (2005). A simulated study on the effects of information volume on traffic signs, viewing strategies and sign familiarity upon driver's visual search performance. *International Journal of Industrial Ergonomics* **35**(12): 1147-1158.

Loczi, J. (1993). Effects of selected car door constraints on selected movement parameters while entering and exiting automobiles. In, University of Illinois, Urbana-Champaign.

Lu, T. W., O'Connor, J. J. (1999). Bone position estimation from skin marker co-ordinates using global optimisation with joint constraints. *Journal of Biomechanics* **32**(2): 129-134.

Maksimovic, R., Popovic, M. (1999). Classification of tetraplegics through automatic movement evaluation. *Medical Engineering & Physics* **21**(5): 313-327.

Marey, E., Demeny, M. (1885). Mesure du travail mécanique effectué dans la locomotion humaine. *Compte-rendu de l'académie des sciences* **9**: 905-909.

- Masoud, O., Papanikolopoulos, N.** (2003). A method for human action recognition. *Image and Vision Computing* **21**(8): 729-743.
- Mavrikios, D., Karabatsou, V., Alexopoulos, K., Pappas, M., Gogos, P., Chryssolouris, G.** (2006). An approach to human motion analysis and modelling. *International Journal of Industrial Ergonomics* **36**(11): 979-989.
- Mavrikios, D., Karabatsou, V., Pappas, M., Chryssolouris, G.** (2007). An efficient approach to human motion modeling for the verification of human-centric product design and manufacturing in virtual environments. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* **23**(5): 533-543.
- McDaniel, J. W.** (1990). Models for Ergonomics Analysis and Design: COMBIMAN and CREWCHIEF. In *Computer-Aided Ergonomics*, in Karwowski W., Genaidy A.M. and Asfour S.S. (Eds), pp. 138-156. Taylor & Francis, London.
- McMillan, A. G., Scholz, J. P.** (2000). Early development of coordination for the sit-to-stand task. *Human Movement Science* **19**(1): 21-57.
- Ménardais, S., Multon, F.** (2001). Amélioration des trajectoires acquises par des systèmes optiques pour l'animation de personnages synthétiques. *Revue internationale de CFAO* **16**(1): 99-113.
- Ménardais, S. e.** (2003). Fusion et adaptation temps réel de mouvements acquis pour l'animation d'humanoïdes synthétiques. Université de Rennes 1.
- Meng, Q., Li, B., Holstein, H.** (2006). Recognition of human periodic movements from unstructured information using a motion-based frequency domain approach. *Image and Vision Computing* **24**(8): 795-809.
- Miller, J., Jenkins, F.** (2002). The Development of a Functional Visualization System for the Creation of Digital Human Models. In *International Symposium of Design Visualisation, Information Visualisation 02*, London UK.
- Molet, T.** (1998). Etude de la capture de mouvements humains pour l'interaction en environnements virtuels. Ecole polytechnique fédérale de Lausanne.
- Monnier, G.** (2004). Simulation de mouvements humains complexes et prédiction de l'inconfort associé- Application à l'évaluation ergonomique du bouclage de la ceinture de sécurité. Institut national des sciences appliquées de Lyon.
- Monnier, G., Wang, X., Dolivet, C., Verriest, J. P., Lino, F., Dufour, F.** (2002). Experimental investigation on the discomfort of safety belt handling. *VDI Berichte* (1675): 467-483+518.
- Monnier, G., Wang, X., Verriest, J. P., Goujon, S.** (2003). Simulation of complex and specific task-orientated movements: Application to the automotive seat belt reaching. *SAE transactions* **112**(7): 715-721.
- Monzani, J.-S., Baerlocher, P., Boulic, R., Thalmann, D.** (2000). Using an intermediate skeleton and inverse kinematics for motion retargeting. 21st Annual Conference (EUROGRAPHICS 2000), August 21, 2000 - August 25, 2000 **19**(3): C-11-C-19.

Moris, J. R. W. (1973). Accelerometry: A technique for the measurement of human body movements. *Journal of Biomechanics* **3**: 431-451.

Multon, F. (1998). Contrôle du Mouvement des Humanodes de Synthèse. Université de Rennes I.

Nakahama, Y., Nemoto, H. (2000). A study of improving vehicle ingress/ egress ease for elderly persons. 00SAF022: 187-193.

Naumann, A., Roetting, M. (2007). Digital Human Modeling for Design and Evaluation of Human-Machine Systems. *MMI-Interaktiv*, Nr. 12, April 2007, ISSN 1439-7854, Naumann & Rötting: 27-35.

Nebel, J. C. (1999). Keyframe Interpolation with Self-Collision Avoidance. In *Eurographics Workshop on Computer Animation and Simulation*, pp. 77- 86. Septembre.

O'Brien, J. F., Bodenheimer Jr, R. E., Brostow, G. J., Hodgins, J. K. (2000). Automatic Joint Parameter Estimation from Magnetic Motion Capture Data. In *Graphics Interface*.

Oudenhuijzen, A., Tan, K., Morsch, F. (2004). The Relationship between Comfort and Knee Angles. In *SAE International conference and exposition of Digital Human Modelling for Design and Engineering*, Rochester, Michigan, USA. SAE paper. 2004-01-2144.

Pandy, M. G., Anderson, F. C. (1998). Dynamic optimization of human gait. *Journal of Biomechanics* **31**(Supplement 1): 115-115.

Park, W., Chaffin, D. B., Rider, K., Martin, B. J. (2003). Simulating complex manual handling motions via motion modification: performance evaluation of motion modification algorithm. In *SAE Digital Human Modeling Conference*.

Park, W., Martin, B. J., Choe, S., Chaffin, D. B., Reed, M. P. (2005). Representing and identifying alternative movement techniques for goal-directed manual tasks. *Journal of Biomechanics* **38**(3): 519-527.

Paul, R. (1981). *Robot Manipulators: Mathematics, Programming and Control*. In MIT Press.

Petzäll, J. (1995). The design of entrances of taxis for elderly and disabled passengers : An experimental study. *Applied Ergonomics* **26**(5): 343-352.

Piazza, S. J., Erdemir, A., Okita, N., Cavanagh, P. R. (2004). Assessment of the functional method of hip joint center location subject to reduced range of hip motion. *Journal of Biomechanics* **37**(3): 349-356.

Piazza, S. J., Okita, N., Cavanagh, P. R. (2001). Accuracy of the functional method of hip joint center location: effects of limited motion and varied implementation. *Journal of Biomechanics* **34**(7): 967-973.

Pochet, P. (2003). Mobilité et accès à la voiture chez les personnes âgées. Evolutions actuelles et enjeux , Travel practices and access to the car among the elderly. Current developments and issues. *Recherche Transports Sécurité* **79**: 93–106.

- Pomero, V.** (2002). Modélisation géométrique et mécanique des muscles du tronc relation entre musculature, troubles posturaux et surcharge vertébrales. Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers - Centre de Paris.
- Porter, J. M., Case, K., Freer, M. T., M, B.** (1993). Computer-Aided Ergonomics Design of Automobiles. In *Automotive Ergonomics*. Eds. Peacock and Karwonski: 43- 78.
- Pradon, D.** (2004). Modélisation 3D du membre supérieur et du rachis : étude de l'influence de réglage de l'assise sur la propulsion du fauteuil roulant. Université Claude Bernard (Lyon 1).
- Press, W. H., Flannery, B. P., Teukolsky, S. A.** (1992). *Numerical Recipes in C The Art of Scientific Computing*. In, Cambridge Univeristy Press.
- Pronost, N.** (2006). Définition et Réalisation d'Outils de Modélisation et de Calcul de mouvement pour des Humanoïdes Virtuels. Université de Rennes 1.
- Pudlo, P.** (1999). Contribution à l'analyse et à l'optimisation du geste du rameur en aviron. Université de Valenciennes et du Hainaut- Cambrésis.
- Pudlo, P., Gorce, P., Wang, X., Thévenon, A., Trasbot, J.** (2008). HANDIMAN : prise en compte des déficiences motrices dans la conception de produits grand public : application à l'automobile et à son accessibilité. *Sciences et Technologies pour le Handicap* 2(1): 85-103.
- Raibert, M. H., Hodgins, J. K.** (1991). Animation of dynamic legged locomotion. In *International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, pp. 349-358. Las Vegas, Nevada, USA. July 28 - August 2.
- Rasmussen, J., Christensen, S. T.** (2005). Musculoskeletal Modelling of Egress With the Anybody Modelling System. In *SAE International conference and exposition of Digital Human Modelling for Design and Engineering*, 2005-01-2721.
- Reed, Matthew P, Parkinson, M. B., Wagner, D. W.** (2004). Torso Kinematics in Seated Reaches. In *SAE International conference and exposition of Digital Human Modelling for Design and Engineering*, 2004-01-2176.
- Rezzoug, N.** (2000). Modélisation dynamique du mouvement de préhension: assistance à la manipulation en milieu encombré. Université de Paris XI.
- Richards, J. G.** (1999). The measurement of human motion: A comparison of commercially available systems. *Human Movement Science* 18(5): 589-602.
- Rider, K. A., Chaffin, D. B., Nebel, K. J., Mikol, K. J.** (2004). Modeling In-Vehicle Reaches Perturbed By Ride Motion. *SAE International conference and exposition of Digital Human Modelling for Design and Engineering*.
- Rigel, S., Assmann, E., Bubb, H.** (2003). Simulation of complex movement sequences in the product development of a car manufacturer. In *SAE International conference and exposition of Digital Human Modelling for Design and Engineering*.
- Rijpkema, H., Girard, M.** (1991). Computer animation of knowledge-based human grasping. In *ACM SIGGRAPH'91*, pp. 339-348. Las Vegas, Nevada, USA, July.

Rittscher, J., Blake, A., Roberts, S. J. (2002). Towards the automatic analysis of complex human body motions. *Image and Vision Computing* **20**(12): 905-916.

Rose, C., Guenter, B., Bodenheimer, B., Cohen, M. F. (1996). Efficient generation of motion transitions using spacetime constraints. *Computer Graphics* **30**(Annual Conference Series): 147–154.

Roux, E. (2002). Mesure du mouvement supérieur et aide à l'interprétation clinique des données. Université de Valenciennes et du Hainaut- Cambrésis.

Ryan, P. W., Springer, W. E. (1969). Cockpit Geometry Evaluation Final Report. In JANAIR Report 69105, Office of Naval Research.

San Marcelino, R. (1996). Modélisation du membre supérieur en situation dynamique, mettant en oeuvre des techniques de la robotique, par l'exploitation des données externes. Université Claude Bernard- Lyon 1.

Schmidt, R., Disselhorst-Klug, C., Silny, J., Rau, G. (1999). A marker-based measurement procedure for unconstrained wrist and elbow motions. *Journal of Biomechanics* **32**(6): 615–621.

Sciavico, L., Siciliano, B. (2001). Modeling and control of robot manipulators. 2nd edition 1-85233-221-2S.

Seidel, G. K., Marchinda, D. M., Dijkers, M., Soutas-Little, R. W. (1995). Hip joint center location from palpable bony landmarks—A cadaver study. *Journal of Biomechanics* **28**(8): 995–998.

Seidl, A., Speyer, H. (1997). RAMSIS - A new CAD tool for ergonomic analysis of vehicles developed for the german automotive industry. In SAE Digital Human Modeling for Design and Engineering Conference, Orlando, Floride.

Sengupta, A., Das, B. (1997). Human : An Autocad based three dimensional anthropometric human model for workstation design. *International Journal of Industrial Ergonomics* **19**: 345-352.

Siegler, S., Liu, W., (1997). Inverse dynamics in Human Locomotion, Three dimensional Analysis of Human Locomotion. In (A. C. P. ALLARD, A. LUNDBERG AND C. VAUGHAN editor), pp. 190-209.

Sternini, D., Cerrone, M. (1995). Setup of an experimental procedure for measuring the human body movements when entering and exiting the vehicle. In 3rd International Conference on Vehicle Comfort and Ergonomics, pp. 257-265.

Striepe, S., Yu, J. (1994). The application of an anthropometric human model program for the design of user-friendly CNC machine tools - Aspects. In 12th Triennial Congress of the International Ergonomics Association, pp. 320-323. Toronto, Canada.

Suescun, A., Wang, X., Doriot, N., Colinet, O., Karabatsou, V. (2001). Scientific research results on virtual human bodies topology, discomfort criteria and movement behaviour. In Deliverable.

- Tessier Y.** (2000). Vers des mannequins numériques intégrés dans la conception de produits In Les modèles numériques de l'homme pour la conception de produits, Lyon-Bron.
- Tiemessen, I. J., Hulshof, C. T. J., Frings-Dresen, M. H. W.** (2007). An overview of strategies to reduce whole-body vibration exposure on drivers: A systematic review. *International Journal of Industrial Ergonomics* 37(3): 245-256.
- Tolani, D., Badler, N.,** (1996). Real-time inverse kinematics of human arm. *Presence* 5(4): 393-401.
- Tolani, D., Goswami, A., Badler, N. I.** (2000). Real-time inverse kinematics techniques for anthropomorphic limbs. *Graphical Models* 62(5): 353–388-353–388.
- Unuma M., A. K., Takeuchi R.,** (1995). Fourier principles for emotion-based human figure animation. In *Proceedings of Computer Graphics*, pp. 91-96.
- Van Hoof, J., van Markwijk, R., Verver, M., Furtado, R., Pewinski, W.,** (2004). Numerical Prediction of Seating Position in Car Seats. In SAE International conference and exposition of Digital Human Modelling for Design and Engineering.
- Vaughan, C. L., Hay, J. G., Andrews, J. G.** (1982). Closed loop problems in biomechanics. Part I--A classification system. *Journal of Biomechanics* 15(3): 197-200.
- Verriest, J. P.** (2000). Les mannequins numériques dans la conception de produits. Les modèles numériques de l'homme pour la conception de produits In, Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité, Lyon.
- Verriest, J. P.** (2003). Man 3D: un mannequin numérique pour la simulation ergonomique. In Journée Thématique de la Société de Biomécanique "Humanoïdes", pp. 9-19. Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis. 15 mai.
- Verriest, J. P., Trasbot, J., Rebiffé, R.,** (1991). MAN3D - a functional and geometric model of the human operator for computer aided ergonomic design. In W. Karwowski and J.W. Yates, *Advances in Industrial Ergonomics and Safety*, Taylor and Francis, London: 901-908.
- Verver, M. M., van Hoof, J.** (2004). A seat sensitivity study on vertical vibrations and seat pressure distributions using numerical models. *SAE transactions* 113(1): 104–110-104–110.
- Viel, E.** (2000). La marche humaine, la course et le saut - Biomécanique, explorations, normes et dysfonctionnements, Masson edition., 2-225-83640-X.
- Wagner, D. W., Reed, M. P., Chaffin, D. B.** (2005). Predicting Foot Positions for Manual Materials Handling Tasks. In SAE International conference and exposition of Digital Human Modelling for Design and Engineering.
- Wang, C. C. L.** (2005). Parameterization and parametric design of mannequins. *Computer-Aided Design* 37(1): 83-98.
- Wang, L., Suter, D.** (2008). Visual learning and recognition of sequential data manifolds with applications to human movement analysis. *Computer Vision and Image Understanding* 110(2): 153-172.

Wang, X. (2002). Prediction of lower-limb movements of clutch pedal operation from an existing motion database. *VDI Berichte (1675)*: 271–283+519.

Wang, X. (2003). Simulation du mouvement humain en vue d'applications ergonomiques - Vers une approche de simulation basée sur données et assistée par connaissance In *Journée Thématique de la Société de Biomécanique "Humanoïdes*, pp. 129-135. Valenciennes.

Wang, X. (2008). Contribution à la simulation du mouvement humain en vue d'applications en ergonomie. UNIVERSITE CLAUDE BERNARD – LYON I.

Wang, X., Dolivet, C., Brunel, N., Minguy, J.-L. (2003). Apport d'enquêtes de terrain puis d'une simulation 3D par mannequin numérique pour l'aménagement spatial d'un poste de conduite de grue portuaire à conteneurs *Workplace design of a gantry container crane cab on the basis of field surveys followed by three-dimensional computer simulation using a digital human model. Recherche - Transports - Sécurité* **78**: 43-61.

Wang, X., Le Breton-Gadegbeku, B., Bouzon, L. (2004). Biomechanical evaluation of the comfort of automobile clutch pedal operation. *International Journal of Industrial Ergonomics* **34**(3): 209-221.

Way, M. L., Berndt, N., Jawad, B. (2003). The Study of a Cockpit with a Fixed Steering Wheel Position: Methods and Model. In *SAE International conference and exposition of Digital Human Modelling for Design and Engineering*, 2003-01-2180.

Welman, C. (1993). Inverse Kinematics and Geometric Constraints for Articulated Figure Manipulation. Simon Fraser University.

Whittle, M. (1991). *Gait Analysis: An introduction.*, Édition Oxford. edition., ISBN: 0-7506-0045-4.

Wieber (2000). Modélisation et commande d'un robot marcheur anthropomorphe. Ecole des mines de Paris.

Wieber, P.-B., Chevallereau, C. (2006). Online adaptation of reference trajectories for the control of walking systems. *Robotics and Autonomous Systems* **54**(7): 559-566.

Winter, D. (1990). *Biomechanics and Motor Control of Human Movement.* John Wiley and Sons, ISBN: 0-471-50908-6.

Witkin, A., Kass, M., (1988). Spacetime Constraints. In *SIGGRAPH'88*, pp. 159-168.

Witkin, A., Popovic, Z. (1995). Motion warping. In *Proceedings of the ACM SIGGRAPH Conference on Computer Graphics*, pp. 105-108. ACM, Los Angeles, CA, USA.

Wu, G., Siegler, S., Allard, P., Kirtley, C., Leardini, A., Rosenbaum, D., Whittle, M., D'Lima, D. D., Cristofolini, L., Witte, H., Schmid, O., Stokes, I. (2002). ISB recommendation on definitions of joint coordinate system of various joints for the reporting of human joint motion—part I: ankle, hip, and spine. *Journal of Biomechanics* **35**(4): 543-548.

Wu, J., Wang, J., Liu, L. (2007). Feature extraction via KPCA for classification of gait patterns. *Human Movement Science* **26**(3): 393-411.

- Yang, J., Abdel-Malek, K., Farrell, K., Nebel, K.** (2004a). The Iowa interactive digital-human virtual environment. In American Society of Mechanical Engineers, Manufacturing Engineering Division, MED, pp. 1061-1069. Anaheim, CA, United states.
- Yang, J., Abdel-Malek, K., Nebel, K.** (2004b). Restrained and unrestrained driver reach barriers. SAE Digital Human Modeling for Design and Engineering: 15-17.
- Yang, J., Kim, J. H., Abdel-Malek, K., Marler, T., Beck, S., Kopp, G. R.** (2007). A new digital human environment and assessment of vehicle interior design. *Human Modeling and Applications* 39(7): 548-558.
- Zatsiorsky, V., Seluyanov, V.** (1983). Estimation of the mass and inertia characteristics of the human body by means of the best predictive regression equations. In Biomechanics IX-B (H. K. WINTER D.A. editor), pp. 233-239. Champaign.
- Zhang, X., Kuo, A. D., Chaffin, D. B.** (1998). Optimization-based differential kinematic modeling exhibits a velocity-control strategy for dynamic posture determination in seated reaching movements. *Journal of Biomechanics* 31(11): 1035-1042.
- Zhang, X., Nussbaum, M. A., Chaffin, D. B.** (2000). Back lift versus leg lift: an index and visualization of dynamic lifting strategies. *Journal of Biomechanics* 33(6): 777-782.
- Zhao, J., Badler, N. I.** (1994). Inverse kinematics positioning using nonlinear programming for highly articulated figures. *ACM Trans. Graph.* 13(4): 313-336.
- Zhu, D., Wang, Z., Huang, H., Shi, M.** (2004). Arm motion planning based on spacetime constraints. In Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, pp. 287-293. SPIE, Tianjin, China.
- Zordan, V. B., Hodgins, J. K.** (1999). Tracking and modifying upper-body human motion data with dynamic simulation. In Eurographics in Computer Animation and Simulation, pp. 13-22. Milano, Italy. September 7-8.

GLOSSAIRE

GLOSSAIRE

- Vocabulaire en rapport avec la voiture -

Bavolet (Cf. Fig. G.1): Un accessoire, de caoutchouc le plus souvent, prolongeant l'aile d'une voiture ou le garde-boue d'une motocyclette pour protéger des projections d'eau ou de boue.

Brancard (Cf. Fig. G.1): Se dit des deux pièces de bois ou de fer qui, dans une voiture à timon et à quatre roues, réunissent le train de derrière et celui de devant.

Distances d'interaction : la distance séparant une partie du corps avec une zone d'influence (brancard, plancher...)

Pied milieu (Cf. Fig. G.1): le pied milieu désigne le montant latéral de chaque côté de la coque, situé entre les places avant et arrière. Il contribue au renforcement de la zone de l'habitacle et à l'absorption des chocs latéraux.

Plancher (Cf. Fig. G.1) : se dit du sol de la voiture sur lequel repose les pieds du conducteur et des passagers

Véhicule expérimental : Le véhicule sur lequel le mouvement d'entrée est mesuré.

Véhicule simulation : Le véhicule sur lequel le mouvement d'entrée est simulé.

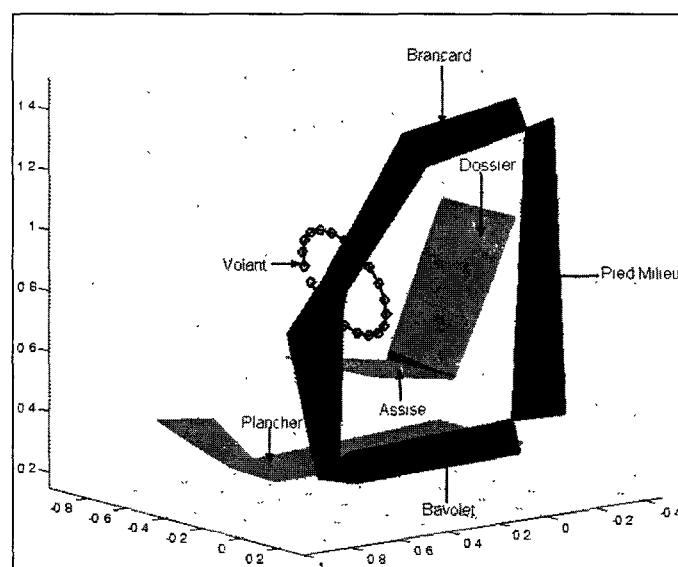


Figure G.1. Les composants principaux de la carrosserie d'un véhicule automobile.

- Plans anatomiques -

Plan frontal (Cf. Fig. G.2): vu de face, il divise le corps humain en deux parties antérieure et postérieure (avant et arrière).

Plan horizontal (Cf. Fig. G.2): il divise la partie supérieure de la partie inférieure du corps.

Plan sagittal (Cf. Fig. G.2): vu de profil, il partage le corps en deux moitiés droite et gauche.

Stratégie motrice : La solution préférentielle que l'être humain choisit afin de gérer ses redondances (cinématiques, musculaires, neuro-musculaires) en vue d'effectuer un mouvement donné.

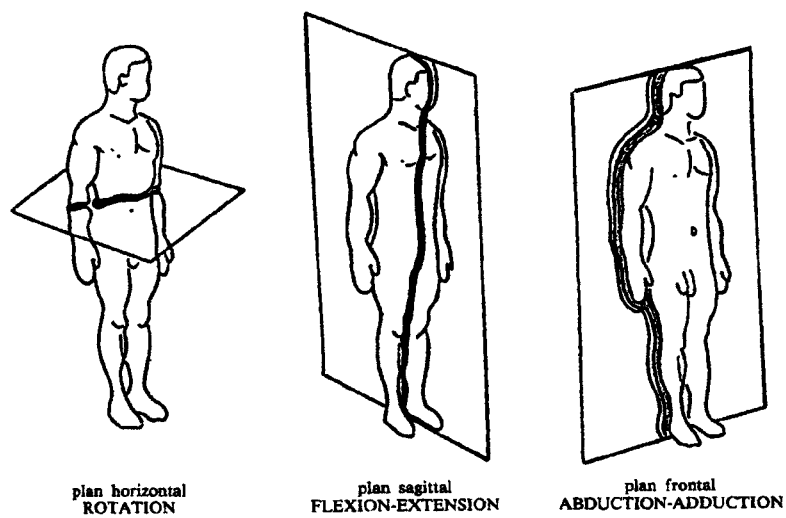


Figure G.2. *Plans anatomiques*

ANNEXES

ANNEXE A.1.1 CINQ MANNEQUINS NUMERIQUES

L'objectif de ce paragraphe est de présenter succinctement 5 mannequins numériques que nous avons rencontré à plusieurs reprises lors de notre étude de l'état de l'art concernant les mannequins numériques, à savoir SAFEWORK™, RAMSIS™, JACK™, MAN3D™ et SANTOS™.

1 SAFEWORK@Pro™ / DELMIA HUMAN™

Le logiciel de simulation SAFEWORK a été conçu à l'Ecole Polytechnique de Montréal au début des années 80. Aujourd'hui ce mannequin est commercialisé par DELMIA, filiale de Dassault Système, sous le nom de HUMAN™.

Le mannequin est composé de 5 modules : un module de construction du mannequin, un module de définition des grandeurs anthropométriques et d'animation manuelle, un module d'analyse de la posture, un module d'analyse de l'activité et un module de simulation permettant d'animer le mannequin dans un environnement 3D.

SAFEWORK/HUMAN™ est composé de 100 corps rigides (permettant une représentation anatomique complète de la colonne vertébrale, des mains, de l'épaule et des hanches) paramétrables au moyen de 104 variables anthropométriques (Cf. figure A.1.1) lui permettant une mobilité à 148 DDL. Le mannequin prend également en considération les limites articulaires.

SAFEWORK/HUMAN™ s'appuie sur des bases de données anthropométriques très complètes (US Army Natick et KRISS 1997). Le mannequin propose des applications avancées comme l'étude du champ de vision, l'analyse du confort postural, les zones d'atteintes, l'analyse des mouvements de lever de charge et de tirer/pousser, la simulation vestimentaire et la détection de collision du mannequin avec son environnement.

L'animation de ce mannequin se fait soit par cinématique directe ou inverse, par atteinte d'un point dans l'espace, par définition d'une trajectoire à partir d'une base de données ou par la capture de mouvements à partir d'un système de capture.

Le mannequin permet de créer des modèles humains (masculins et féminins, civiles et militaires) du 5^{ème}, 50^{ème} et 95^{ème} percentile de la population.

Les outils d'analyse ergonomique, fournis dans HUMAN™, comprennent un modèle permettant le calcul des efforts en condition statique, les valeurs limites de port de charge et de tirer/pousser, le calcul de la dépense et les évaluateurs ergonomiques RULA, NIOSH, MTM...



Figure A.1.1. *Le mannequin SAFEWORk™.*

2 RAMSIS™

Le mannequin numérique RAMSIS™ (Realistic Anthropological Mathematical System for Interior – comfort Simulation) a été développé suite à une collaboration entre un group de recherche d'industriels automobiles Allemands FAT (Forschungsgruppe AutomobilTechnik), la société allemande Tecmath et l'Université Technologique de Munich (Bubb et al., 2006) à partir de 1987. Aujourd'hui, le logiciel RAMSIS™ est commercialisé par la société HUMAN SOLUTION GmbH. A l'origine le mannequin RAMSIS™ a été développé pour aider dans la conception d'intérieurs de véhicules (Suescun et al., 2001).

Le mannequin est passé par deux phases de développement (Bubb et al., 2006). Lors de la première phase, seuls les modules anthropométriques et de prédiction de l'inconfort posturale sont intégrés dans le mannequin. La deuxième phase a permis d'intégrer les modules d'analyse de la force et de simulation de mouvements.

Aujourd'hui le mannequin RAMSIS™ contient 54 segments et 53 articulations lui permettant une mobilité à 104 DDL. Il dispose d'un modèle complet de la main lui permettant de réaliser des gestes de préhension (Suescun et al., 2001). Il est capable de gérer la collision avec son environnement et avec différentes parties de son corps. Il comprend plusieurs bases de données anthropométriques pour adultes, enfants (Arlt et Marach, 1998) et pour différentes nationalités (Européenne, Américaine et Asiatique) auxquelles il est possible d'ajouter des bases de données propres aux clients (Ford, Renault-PSA). Les bases de données anthropométriques de RAMSIS sont construites en utilisant le logiciel à base de traitements d'images nommé PCMAN (Seitz et al., 2000). Il peut être utilisé pour observer le champ de vision du mannequin, ou définir les zones d'atteintes.

Il est animé soit d'une manière manuelle (cinématique directe) ou automatique (cinématique inverse ou par définition d'un point d'atteinte dans l'espace), il est capable de générer des trajectoires entre deux postures clés.

Le mannequin RAMSIS™ est utilisé dans plusieurs applications en rapport avec l'automobile, plusieurs constructeurs automobiles ont eu recours à l'usage de ce mannequin. Parmi les fonctionnalités du mannequin on retrouve : l'aide à la conception de l'intérieur d'un

véhicule, la prédiction de la posture du conducteur sur le siège et le confort associé, la prédiction de l'efficacité de la ceinture en cas d'accident et la vision miroir afin de connaître les champs de vision dans les rétroviseurs.

Aujourd'hui, le mannequin numérique RAMSIS™ est utilisé par plus de 60% des constructeurs automobiles à travers le monde pour effectuer des analyses ergonomiques portant sur le confort des usagers des véhicules et l'aménagement des postes de travail (Naumann et Roetting, 2007). Des exemples de politiques d'intégration de ce mannequin chez certains constructeurs sont présentés dans la littérature comme le cas BMW (Stahlecker et Kress, 2003).

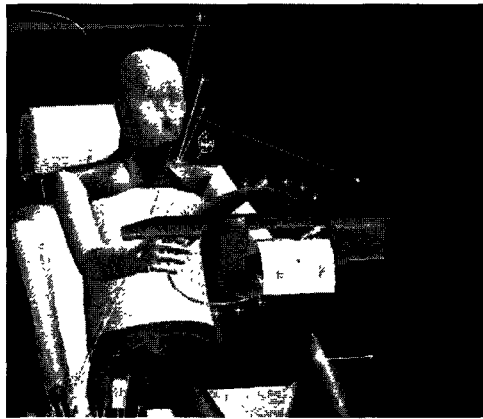


Figure A.1.2. Le mannequin RAMSIS™.

3 Jack™

La mannequin numérique Jack™ a été développé au Center for Human Modeling and Simulation de l'université de Pennsylvanie au cours des années 80 et 90. Au départ il était développé comme un outil ergonomique au service de la NASA, par la suite d'autres partenaires se sont impliqués dans le financement du projet comme l'U.S. Navy, l'U.S. Army et l'U.S. Air Force. A partir de 1996, le logiciel est commercialisé par la société UGS-PLM solution.

Jack™ est constitué de 69 segments (dont 17 segments pour représenter la partie de la colonne vertébrale située en dessous du cou), de 68 articulations lui permettant une mobilité à 135 DDL. Il dispose d'un modèle sophistiqué de l'épaule (Dickerson et al., 2004), d'un modèle de la main totalement articulé comportant 16 segments. Jack dispose de plusieurs bases de données pour les dimensions anthropométriques représentant différentes populations de différentes nationalités (Kouchi et al., 2004), lui permettant de simuler les mouvements du 1^{er}, 5^{ème}, 50^{ème}, 95^{ème} et 99^{ème} percentiles de la population (Suescun et al., 2001). Il peut être animé manuellement soit par cinématique directe et/ou inverse (Zhao et Badler, 1994) soit en précisant le point à atteindre. Il est également possible d'animer ce mannequin grâce à des données provenant de systèmes d'analyse de mouvements (Duffy, 2005), de gants numériques de type Cyberglove® ou issues de systèmes de vision stéréoscopique tels que des casques

immersifs. Le mannequin peut détecter automatiquement les collisions des différentes parties de son corps entre elles et avec l'environnement dans lequel il évolue.

Le mannequin numérique JackTM fait usage de plusieurs évaluateurs ergonomiques comme NIOSH, RULA ou OWAS, il permet également de prédire le temps nécessaire à la réalisation d'une tâche en utilisant MMT.

Le mannequin numérique JackTM permet une multitude d'applications comme la simulation des mouvements d'atteinte, l'étude du champs de vision, l'étude de la sécurité et du risque de blessures (Ambrose et al., 2004; Rider et al., 2004; Duffy, 2005), l'estimation du taux de fatigue et l'étude du confort postural.



Figure A.1.3. *Le mannequin JackTM.*

4 MAN 3DTM

MAN3DTM est un mannequin numérique géométrique développé par le Laboratoire de Biomécanique et Mécanique des Chocs de l'INRETS Lyon Bron en collaboration avec le constructeur automobile Renault à la fin des années 80 (Verriest, 1991). MAN3DTM est un logiciel académique (sans commercialisation) utilisé à des fins de recherches et de démonstrations (Suescun et al., 2001; Beurrier et Wang, 2004).

MAN3DTM est doté de 55 segments corporels liés par 56 articulations à 1, 2 ou bien 3 DDL lui permettant une mobilité globale à 104 DDL, il dispose d'un modèle de la main à 25 DDL (Savescu et al., 2004). La convention de Denavit et Hartenberg (Denavit et Hartenberg, 1955) est utilisée dans le processus de modélisation des différentes articulations du mannequin. MAN3DTM est utilisé dans plusieurs applications liées à l'automobile, par exemple, dans l'étude des mouvements d'atteinte afin d'aménager l'intérieur d'un véhicule, l'étude des champs de vision, l'étude de l'inconfort lié au mouvement de débrayage (Wang, 1999), l'inconfort des usagers d'une grue (Wang et al., 2003) ou la prédiction de l'inconfort lié à l'usage de la ceinture de sécurité (Monnier, 2004). Il a été utilisé dans la simulation des mouvements d'accessibilité automobile chez les personnes saines (le Projet Européen

REALMAN, IST-2000-29357) ou bien des personnes à mobilités réduites (Le projet national HANDIMAN, RNTS 2004).



Figure A.1.4. Le mannequin MAN3D™.

5 SANTOS™

Le mannequin numérique SANTOS™ est développé depuis 2003 par le professeur K. Abdel-Malek de l'université de l'IOWA en réponse à un projet de simulation de soldat virtuel financé par l'armée Américaine (Abdel-Malek et al., 2006). Contrairement aux autres mannequins numériques qui optent pour l'usage de mouvements enregistrés dans des bases de données, SANTOS™ favorisent plutôt le développement de modèles physiques (Wang, 2008), il utilise une procédure à base d'optimisations pour prédire les postures ainsi que les mouvements (Abdel-Malek et al., 2006). Le mannequin SANTOS™ est aussi doté d'un module de simulation à base d'optimisations de la dynamique (force) liés aux différents mouvements (Kim et al., 2006). Il permet également de simuler les fonctionnalités vitales (micro biomécaniques) d'un être humain (comme les battements cardiaques et la pression sanguine).

SANTOS™ dispose d'une mobilité à 103 DDL, avec un modèle de la main à 25 DDL (Abdel-Malek et al., 2006). La convention de Denavit et Hartenberg (1955) est utilisée dans le processus de modélisation des différentes articulations du mannequin (Yang et al., 2004). Il prend également en considération les limites articulaires et intègre un module d'évitement de collisions entre les différentes parties de son corps ainsi que la collision du mannequin avec son environnement.

SANTOS™ dispose d'un modèle musculo-squelettique qui lui permet de simuler les contractions musculaires et les déformations de la peau. Il intègre également des modules d'inconfort et d'équilibre postural.

Le mannequin propose des applications avancées comme l'étude du champ de vision, les zones d'atteintes, la simulation vestimentaire et la fatigue liée à une tâche donnée. Il peut simuler les mouvements du 5^{ème}, 50^{ème} et 95^{ème} percentiles de la population masculine (Yang

et al., 2007). Le mannequin est doté également d'un module d'intelligence artificielle lui permettant de réagir face à différentes situations.

L'animation de ce mannequin se fait soit par cinématique directe, inverse ou cinématique inverse avancée où des contraintes liées au mouvement et au métabolisme humain sont intégrées dans un programme d'optimisations multi objectifs (Abdel-Malek et al., 2006). Le mannequin peut être également animé par atteinte d'un point dans l'espace, par définition d'une trajectoire à partir d'une base de données ou par la capture de mouvements à partir d'un système de capture.



Figure A.1.5. *Le mannequin SANTOS™.*

Bibliographie.

Abdel-Malek, K., Yang, J., Marler, T., Beck, S., Mathai, A., Zhou, X., Patrick, A., Arora, J. (2006). Towards a new generation of virtual humans. *International Journal of Human Factors Modelling and Simulation* 1: 2-39.

Ambrose, D. H., Cole, G. P., Gallagher, S. (2004). Estimating Low Back Loads of Underground Mine Roof Bolter Operators using Digital Human Simulations. In *SAE International conference and exposition of Digital Human Modelling for Design and Engineering*, 2004-01-2148.

Arlt, F., Marach, A. (1998). CAD modelling of a human 3D child body. *International Journal of Industrial Ergonomics* 22(4-5): 333-341-333-341.

Beurier, G., Wang, X. (2004). Motion Conversion between Digital Human Models A Case Study from Ramsis to Man3D. In *SAE International conference and exposition of Digital Human Modelling for Design and Engineering*, Rochester, Michigan, USA, 2004-01-2194.

Bubb, H., Engstler, F., Fritzsche, F., Mergl, C., Sabbah, O., Schaefer, P., Zacher, I. (2006). The development of RAMSIS in past and future as an example for the cooperation between industry and university. *International Journal of Human Factors Modelling and Simulation* 1: 140-157.

Denavit, J., Hartenberg, R. S. (1955). A kinematic notation for lower pair mechanism based on matrices. *Journal of Applied Mechanics* 22: 215-221.

- Dickerson, C. R., Rider, K. A., Chaffin, D. B.** (2004). Merging Biomechanical Models of the Shoulder with Digital Human Modeling. In SAE International conference and exposition of Digital Human Modelling for Design and Engineering, 2004-01-2166.
- Duffy, V. G.** (2005). Digital human modeling for applied ergonomics and human factors engineering. In Proceedings of CybErg 2005. The Fourth International Cyberspace Conference on Ergonomics., International Ergonomics Association Press, Johannesburg.
- Kim, J. H., Abdel-Malek, K., Yang, J., Marler, R. T.** (2006). Prediction and analysis of human motion dynamics performing various tasks. *International Journal of Human Factors Modelling and Simulation* **1**: 69-94.
- Kouchi, M., Mochimaru, M., Higuchi, M.** (2004). A validation method for digital human anthropometry: Towards the standardization of validation and verification. *SAE transactions* **113(1)**: 254-259.
- Monnier, G.** (2004). Simulation de mouvements humains complexes et prédiction de l'inconfort associé- Application à l'évaluation ergonomique du bouclage de la ceinture de sécurité. Institut national des sciences appliquées de Lyon.
- Naumann, A., Roetting, M.** (2007). Digital Human Modeling for Design and Evaluation of Human-Machine Systems. *MMI-Interaktiv*, Nr. 12, April 2007, ISSN 1439-7854, Naumann & Rötting: 27-35.
- Rider, K. A., Chaffin, D. B., Foulke, J. A., Nebel, K. J.** (2004). Analysis and Redesign of Battery Handling using Jack and HUMOSIM Motions. In SAE International conference and exposition of Digital Human Modelling for Design and Engineering, 2004-01-2145.
- Savescu, A. V., Cheze, L., Wang, X., Beurier, G.** (2004). A 25-Degrees-Of-Freedom Hand Geometrical Model for Better Hand Attitude Simulation.
- Seitz, T., Balzulat, J., Bubb, H.** (2000). Anthropometry and measurement of posture and motion. *International Journal of Industrial Ergonomics* **25(4)**: 447–453-447–453.
- Stahlecker, H. F., Kress, H.** (2003). Integration of 3D Human Models in the Vehicle Concept Development of BMW. In SAE International conference and exposition of Digital Human Modelling for Design and Engineering, 2003-01-2193.
- Suescun, A., Wang, X., Doriot, N., Colinet, O., Karabatsou, V.** (2001). Scientific research results on virtual human bodies topology, discomfort criteria and movement behaviour. In Deliverable.
- Verriest, J. P., Trasbot, J., Rebiffé, R.,** (1991). MAN3D - a functional and geometric model of the human operator for computer aided ergonomic design. In W. Karwowski and J.W. Yates, *Advances in Industrial Ergonomics and Safety*, Taylor and Francis, London: 901-908.
- Wang, X.** (1999). A behavior-based inverse kinematics algorithm to predict arm prehension postures for computer-aided ergonomic evaluation. *Journal of Biomechanics* **32(5)**: 453-460.
- Wang, X.** (2008). Contribution à la simulation du mouvement humain en vue d'applications en ergonomie. UNIVERSITE CLAUDE BERNARD – LYON I.

Wang, X., Dolivet, C., Brunel, N., Minguy, J.-L. (2003). Apport d'enquêtes de terrain puis d'une simulation 3D par mannequin numérique pour l'aménagement spatial d'un poste de conduite de grue portuaire à conteneurs Workplace design of a gantry container crane cab on the basis of field surveys followed by three-dimensional computer simulation using a digital human model. *Recherche - Transports - Sécurité* **78**: 43-61.

Yang, J., Abdel-Malek, K., Farrell, K., Nebel, K. (2004). The Iowa interactive digital-human virtual environment. In American Society of Mechanical Engineers, Manufacturing Engineering Division, MED, pp. 1061-1069. Anaheim, CA, United states.

Yang, J., Kim, J. H., Abdel-Malek, K., Marler, T., Beck, S., Kopp, G. R. (2007). A new digital human environment and assessment of vehicle interior design. *Human Modeling and Applications* **39**(7): 548-558.

Zhao, J., Badler, N. I. (1994). Inverse kinematics positioning using nonlinear programming for highly articulated figures. *ACM Trans. Graph.* **13**(4): 313-336.

http://www.safework.com/safework_pro/sw_pro.html

http://www.human-solutions.com/index_de.php

http://www.plm.automation.siemens.com/fr_fr/products/tecnomatix/assembly_planning/jack/index.shtml

<http://www.santoshumaninc.com/>

ANNEXE A.2.1 MATRICE DE TRANSFORMATION HOMOGENE

Soit un repère orthonormé de référence nommé $O_0X_0Y_0Z_0$, associé à un corps de base 0, et un autre repère, associé à un autre corps 1, nommé $O_1X_1Y_1Z_1$, les rotations de ce dernier autour des axes O_0X_0 , O_0Y_0 et O_0Z_0 par (respectivement) les angles α , β et γ sont données par les matrices suivantes (Cf. Fig. A.2.1.1) :

$$R_x(\alpha) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix}, \quad R_y(\beta) = \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad R_z(\gamma) = \begin{bmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Les matrices R_x , R_y et R_z sont appelées les **matrices de cosinus directeur**. La translation entre les deux repères est représentée par un vecteur colonne de trois lignes, représentant le taux de translation par rapport à un axe donné. La combinaison des mouvements de rotation et de translation est représentée par une **matrice de transformation homogène**. La matrice de transformation homogène est représentée sous la forme suivante

$$A = \begin{bmatrix} R & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Avec :

R : rotation, T : Translation

$R = R_x \times R_y \times R_z$, $T = O_0O_1$

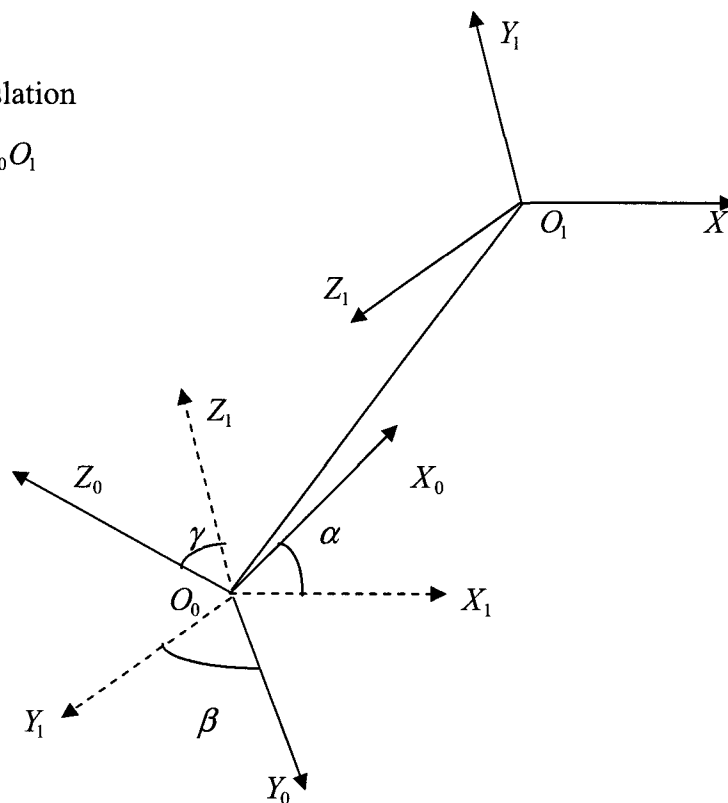


Figure A.2.1.1. Passage entre deux repères par la matrice homogène.

ANNEXE A.2.2 RAPPELES SUR AFCM + CHA

A.2.2.1 Analyse Factorielle de Correspondances Multiples (AFCM)

L'analyse factorielle des correspondances (AFC), ou analyse des correspondances simples, est une méthode exploratoire d'analyse des tableaux de contingence. Elle a été développée essentiellement par J.-P. Benzecri durant la période 1970-1990 (Lebart et al., 2006). Elle consiste à rechercher la meilleure représentation simultanée de deux ensembles constituant les lignes et les colonnes d'un tableau de contingence, ces deux ensembles jouant un rôle symétrique. L'analyse factorielle des correspondances vise à rassembler en un nombre réduit de dimensions la plus grande partie de l'information initiale en s'attachant non pas aux valeurs absolues mais aux correspondances entre les variables, c'est-à-dire aux valeurs relatives. Cette réduction est d'autant plus utile que le nombre de dimensions initial est élevé. La notion de « réduction » est commune à toutes les techniques factorielles – c'est-à-dire où des facteurs sont extraits – l'AFC offre la particularité (contrairement aux ACP) de fournir un espace de représentation commun aux variables et aux individus. Pour cela l'AFC raisonne à partir de tableau réduit ou de fréquences. L'Analyse Factorielle des Correspondances Multiples (AFCM) est un cas particulier de l'AFC appliquée non plus à une table de contingence, mais à un tableau disjonctif complet (Lebart et al., 2006).

L'AFC est présentée de différentes manières dans la littérature (Lebart et al., 2006). Mathématiquement, après avoir centré et réduit le tableau de données affecté d'un système de masse (par exemple, les sommes marginales de chaque ligne), la matrice d'inertie associée est calculée et diagonalisée (la répartition de l'information selon les différents axes est représentée par l'histogramme des valeurs propres). Un changement de base selon ses vecteurs propres, c'est-à-dire selon les axes principaux d'inertie du nuage de points, est alors effectué. On projette alors les points figurant sur chaque ligne sur les nouveaux axes. L'ensemble de l'information est conservée, mais celle-ci est maintenant hiérarchisée, axe d'inertie par axe d'inertie. L'histogramme des valeurs propres permet de voir le type de répartition de l'information entre les différents axes et l'étendue en dimension de celle-ci. Le premier axe d'inertie oppose les points, c'est-à-dire les lignes du tableau ayant les plus grandes distances ou « différences ». La première valeur propre d'inertie, (associée à ce premier axe) mesure la quantité d'information présente le long de cet axe. Les différents axes sont ainsi analysés, en reconstituant progressivement la totalité des données.

Du point de vue algorithmique, soit un tableau à X lignes de modalités r et Y colonnes de modalité c. L'application d'une analyse factorielle des correspondances sur ce tableau passe par les 8 étapes suivantes :

- **Etape N°1 : calcul des tableaux de profils lignes et de profils colonnes**

On appelle profil ligne (colonne), la ligne (la colonne) obtenue en divisant chaque élément de la ligne (la colonne) par la somme de la ligne (la colonne) considérée.

Si on note par X_1 le tableau de profils lignes et par Y_1 le tableau de profils colonnes.

Le calcul des profils -lignes se fait en suivant la formule suivante :

$$X_1(i, j) = \frac{X(i, j)}{\sum_{i=1}^c X(i, j)} \quad [A.2.2.1]$$

Le calcul des profils -colonnes se fait en suivant la formule suivante :

$$Y_1(i, j) = \frac{X(i, j)}{\sum_{j=1}^r X(i, j)} \quad [A.2.2.2]$$

- **Etape N°2 : détermination de la matrice d'inertie**

Dans un premier temps, on calcule la **moyenne pondérée** des r points lignes g_j donnée par l'expression suivante :

$$g_j = \frac{\sum_{i=1}^r X(i, j)}{\sum_{i,j} X(i, j)} \quad [A.2.2.3]$$

Puis on construit la matrice G en écrivant r fois en ligne les c valeurs obtenues g_j

Puis on construit la matrice D_1 dont les éléments diagonaux sont donnés par l'expression suivante :

$$\frac{\sum_{j=1}^c X(i, j)}{\sum_{i,j} X(i, j)} \quad [A.2.2.4]$$

Finalement on calcul de la matrice d'inertie V donnée par l'expression suivante

$$V = (X_1 - G)^T D_1 (X_1 - G) \quad [A.2.2.5]$$

- **Etape N°3 : Calcul de la matrice C**

Une fois la matrice d'inertie V est obtenue, on calcule la matrice C donnée par l'expression suivante :

$$C = \sqrt{M} V \sqrt{M} \quad [A.2.2.6]$$

Avec M : La matrice diagonale composée des termes $\frac{\sum_{i,j} X(i, j)}{\sum_{i=1}^r X(i, j)}$

- **Etape N°4 : Recherche des valeurs propres k_l et des vecteurs propres V_l de la matrice C**

- **Valeurs propres de C**

Les valeurs propres de la matrice C sont obtenues en diagonalisant de la matrice C

- Vecteurs propres

Les vecteurs propres de la matrice C sont obtenus en résolvant l'équation suivante :

$$(C - \lambda I)V_1 = 0$$

Les valeurs propres correspondent aux axes factoriels sur lesquels on projettera les différents points.

Pour chaque axe d'inertie on définit l'inertie expliquée par l'expression suivante :

$$100 \times \frac{k_1}{\sum_{i=1}^c k_i}$$

- **Etape N°5 : Calcul des axes principaux d'inertie**

L'étape suivante consiste à calculer les axes principaux d'inertie μ_1 . Ils sont donnés par l'expression suivante :

$$\mu_1 = \sqrt{M^{-1}} \times V_1 \quad [A.2.2.7]$$

- **Etape N° 6 : Calcul des composantes principales des points lignes**

Les composantes principales des points lignes Y sont calculées par l'expression suivante :

$$Y = X_1 M U \quad [A.2.2.8]$$

Avec

X_1 : Matrice des profils lignes

U : matrice formée par les axes principaux d'inertie.

- **Etape N°7 : calcul des correspondances principales des points colonnes**

Les correspondances principales des points colonnes s'obtiennent par l'expression suivante :

$$Z = K \times Y^T \times X_j \quad [A.2.2.9]$$

Avec

Y^T : La matrice composée des $\frac{1}{\sqrt{k_1}}$ sur la diagonale.

- **Etape N°8 : représentation graphique des points ligne et des points colonne.**

Une fois que les points lignes et les points colonnes sont calculés, ils seront représentés sur un graphique en 2D ou bien en 3D. Généralement on les projette sur des plans 2D, en considérant les axes d'inertie deux par deux. La représentation des points lignes et les points colonnes doivent se faire sur un même graphique.

Interprétation des résultats de l'AFC

Les résultats de l'AFC sont interprétés en utilisant deux facteurs : en calculant les contributions (contributions absolues) ou bien en calculant les cosinus carrés (contributions relatives).

Du point de vue graphique, les points les plus significatifs dans une étude correspondent aux points les plus près des axes factoriels et les plus loin du centre.

Calcul des contributions (contributions absolues)

Le calcul des contributions, revient à chercher à connaître le rôle joué par un point dans la détermination d'un axe factoriel d'inertie. C'est particulièrement utile pour l'interprétation thématique.

Soit un point ligne i et un point colonne j . α étant un axe factoriel, le calcul de la contribution en ligne est donné par l'expression suivante (Lebart et al., 2006) :

$$C_{i\alpha}(i) = \frac{F_i Y^2(i, \alpha)}{\lambda_\alpha}, \text{ avec } F_i = \frac{\sum_{j=1}^c n_{ij}}{n} \text{ et } \lambda_\alpha = \sum_{i=1}^r F_i Y^2(i, \alpha)$$

et le calcul de la contribution en colonne est donné par l'expression suivante (Lebart et al., 2006) :

$$C_{i\alpha}(j) = \frac{F_j Z^2(j, \alpha)}{\lambda_\alpha}, \text{ avec } F_j = \frac{\sum_{i=1}^r n_{ij}}{n}$$

Calcul des cosinus carrés (contributions relatives)

Par le calcul des cosinus carrés des angles formés par chaque point avec l'un des axes factoriels, on cherche à savoir si le point en question est bien représenté dans le sous-espace factoriel considéré (Lebart et al., 2006). Le cosinus de l'angle (qui varie entre -1 et $+1$) permet d'interpréter la perspective qu'on ne visualise pas dans une représentation en deux dimensions. Lorsque le cosinus est faible on peut considérer que le point est proche de l'axe, qu'il joue donc beaucoup dans sa définition et, inversement, plus il s'en éloigne moins son rôle est prédominant dans l'interprétation.

Soit un point ligne i et un point colonne j . α étant un axe factoriel, la contribution relative du point i dans la formation de l'axe factoriel α est donnée par l'expression suivante :

$$\text{Cos}_\alpha^2(i) = \frac{d_\alpha^2(i, G)}{d^2(i, G)} = \frac{Y^2(i, \alpha)}{d^2(i, G)}, \text{ avec } d^2(i, G) = \sum_{j=1}^c \frac{1}{f_{.j}} \left(\frac{f_{ij}}{f_{.j}} - f_{.j} \right)^2 \text{ est le carré de la distance du}$$

point i au centre de gravité et $f_{.j} = \frac{n_{.j}}{n}$ le profile moyen.

La contribution relative du point j dans la formation de l'axe factoriel α est donnée par l'expression suivante :

$$\text{Cos}_\alpha^2(j) = \frac{d_\alpha^2(j, G)}{d^2(j, G)} = \frac{Z^2(j, \alpha)}{d^2(j, G)}, \text{ avec } d^2(j, G) = \sum_{i=1}^r \frac{1}{f_{i.}} \left(\frac{f_{ij}}{f_{i.}} - f_{i.} \right)^2 \text{ est le carré de la distance du}$$

point j au centre de gravité.

L'exemple suivant illustre les différentes étapes de l'AFC citées ci-dessus.

Exemple d'AFC

Une entreprise souhaite faire un sondage sur la fréquence de consultation médicale chez les différentes classes de ses fonctionnaires (Cadres, employés...), et obtient le tableau suivant :

	Consultations de 0 à 6 fois	Consultations de 7 à 12 fois	Consultation s >12 fois	La somme
Cadres > 40ans	5	7	3	15
Cadres < 40ans	5	5	2	12
Employés >40 ans	2	12	6	20
Employés <40 ans	24	18	12	54
Personnels du bureau	12	8	4	24
La somme	48	50	27	125

Tableau A.2.2.1. *Fréquences de consultation des employés de l'entreprise.*

Etude des résultats par l'AFC

Ci après sont détaillés les résultats d'application des différentes étapes de l'AFC dans l'étude du tableau A.2.2.1.

- **Etape N° 1 : Profiles lignes X_i**

Les profiles ligne sont calculés en utilisant la formule A.2.2.1.

5/15	7/15	3/15
5/12	5/12	2/12
2/20	12/20	6/20
24/54	18/54	12/54
12/24	8/24	4/24

Tableau A.2.2.2. *Tableau des profiles ligne X_i .*

Profile colonnes X_j

Les profiles colonne sont calculés en utilisant la formule A.2.2.2.

5/48	7/50	3/27
5/48	5/50	2/27
2/48	12/50	6/27
24/48	18/50	12/27
12/48	8/50	4/27

Tableau A.2.2.3. *Tableau des profiles colonnes X_j .*

- **Etape 2 : Détermination de la matrice d'inertie**

On a $r=5$ et $c=3$. La matrice d'inertie est calculée à partir des formules A.2.2.3, A.2.2.4 et A.2.2.5.

$$g_1 = \frac{\sum_{i=1}^5 X(i,1)}{\sum_{i,j} X(i,j)} = 48/125$$

$$g_2 = \frac{50}{125}$$

$$g_3 = \frac{27}{125}$$

$$G = \begin{bmatrix} 0.384 & 0.4 & 0.216 \\ 0.384 & 0.4 & 0.216 \\ 0.384 & 0.4 & 0.216 \\ 0.384 & 0.4 & 0.216 \\ 0.384 & 0.4 & 0.216 \end{bmatrix}$$

$$D_I = \frac{\sum_{j=1}^3 X(i,j)}{\sum_{i,j} X(i,j)}$$

$$D_I = \begin{bmatrix} \frac{15}{125} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{15}{125} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{15}{125} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{15}{125} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{15}{125} \end{bmatrix}$$

$$V = (X_I - G)^T D_I (X_I - G)$$

$$V = \begin{bmatrix} 0.0175 & -0.0127 & -0.0048 \\ -0.0127 & 0.0017 & 0.0029 \\ -0.0048 & 0.0029 & 0.0019 \end{bmatrix}$$

- **Etape N°3 : calcul de la matrice C**

La matrice C est calculée à partir de la formule A.2.2.6.

$$C = \begin{bmatrix} 0.0455 & -0.0323 & -0.0167 \\ -0.0323 & 0.0243 & 0.01 \\ -0.0167 & 0.01 & 0.0087 \end{bmatrix}$$

- **Etape N°4 : Recherche des valeurs propres k_I et des vecteurs propres V_I de la matrice C**

Par la suite les valeurs propres et les vecteurs propres de la matrice C sont calculés.

$$k_1 = 0.0746$$

$$k_2 = 0.0039$$

$$k_3 = 0$$

Inertie expliquée

$$k_1 = 100 \times \frac{0.0746}{0.0746 + 0.0039 + 0} = 95,03\%$$

$$k_2 = 4.97\%$$

$$k_3 = 0\%$$

$$v_1 = \begin{bmatrix} 0.7807 \\ -0.5576 \\ -0.2821 \end{bmatrix}, v_2 = \begin{bmatrix} 0.0807 \\ 0.5377 \\ 0.8393 \end{bmatrix} \text{ et } v_3 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

- **Etape N°5 : Calcul des axes principaux d'inertie**

Les axes principaux d'inertie sont déterminés à partir de la formule A.2.2.7.

$$\mu_1 = \begin{bmatrix} 0.4838 \\ 0.3527 \\ -0.1311 \end{bmatrix}, \mu_2 = \begin{bmatrix} 0.05 \\ 0.3401 \\ -0.3901 \end{bmatrix} \text{ et } \mu_3 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

- **Etape N°6 : Calcul des composantes principales des points lignes**

Les composantes principales des points lignes sont calculées en utilisant la formule A.2.2.8.

$$Y = \begin{bmatrix} -0.1129 & 0.0790 \\ 0.0564 & 0.1075 \\ -0.5851 & 0.0186 \\ 0.1311 & -0.06 \\ 0.2344 & 0.0475 \end{bmatrix}$$

- **Etape N°7 : calcul des correspondances principales des points colonnes**

Les composantes principales des points colonnes sont calculées en utilisant la formule A.2.2.9.

$$Z = \begin{bmatrix} 0.3442 & -0.2401 & -0.1658 \\ 0.0081 & 0.0531 & -0.1128 \end{bmatrix}$$

Calcul des contributions relatives en ligne

Le tableau A.2.2.4 présente les contributions relatives des différentes catégories d'employé impliquées dans l'étude.

	Axe 1	Axe 2
	Contribution relative (%)	Contribution relative (%)
Cadres > 40ans	2.05	19.17
Cadres < 40ans	0.41	28.42
Employés > 40 ans	73.39	1.43
Employés < 40 ans	9.96	39.88
Personnels du bureau	14.19	11.11
Cadres > 40ans	2.05	19.17

Tableau A.2.2.4. Contributions relatives en ligne des différentes catégories d'employés impliquées dans l'étude dans la constitution des 2 axes du premier plan factoriel.

Calcul des contributions relatives en colonne

Le tableau A.2.2.5 présente les contributions relatives des différentes fréquences de consultation des différentes catégories d'employé.

	Axe 1	Axe 2
	Contribution relative (%)	Contribution relative (%)
Consultations de 0 à 6 fois	60.95	0.65
Consultations de 7 à 12 fois	31.09	28.91
Consultations supérieures à 12 fois	7.96	70.44

Tableau A.2.2.5. Contributions relatives en colonne des fréquences de consultation des différentes catégories d'employés impliquées dans l'étude dans la constitution des 2 axes du premier plan factoriel.

A.2.2.2 Classification Hiérarchique Ascendante

La classification hiérarchique ascendante fait partie des méthodes de classification automatique dites « non supervisées ». L'expression « non supervisée » fait référence au fait qu'aucun « superviseur » n'est là pour nous dire à quelle population appartient telle ou telle observation. L'objectif principal des méthodes de classification automatique est de répartir les éléments d'un ensemble en groupes, c'est-à-dire d'établir une partition de cet ensemble, chaque groupe devant être le plus homogène possible, et les groupes devant être les plus différents possibles entre eux.

La classification hiérarchique ascendante (CAH) consiste à agréger progressivement les individus selon leur ressemblance, mesurée à l'aide d'un indice de similarité ou de dissimilarité appelé « la distance d'agrégation ». L'algorithme commence par rassembler deux à deux les couples d'individus les plus ressemblants, puis à agréger progressivement les autres individus ou groupes d'individus en fonction de leur ressemblance, jusqu'à ce que la totalité des individus ne forme plus qu'un seul groupe (Figure A.2.2.1). A chaque étape, les deux groupes qui vont fusionner sont ceux dont la distance d'agrégation est la plus faible.

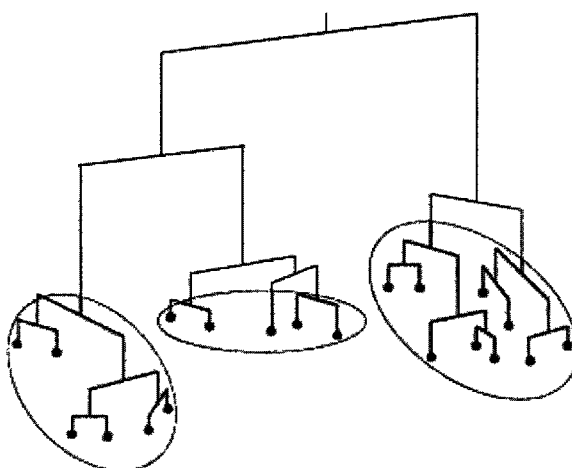


Figure A.2.2.1. Dendrogramme ou arbre hiérarchique (Lempereur, 2006).

Les techniques de classification présentent des processus itératifs et font appel à une démarche algorithmique. L'algorithme fondamental de la classification hiérarchique ascendante se présente comme suit :

- 1/- Disposer d'un ensemble E de n éléments à classer.
- 2/- Chercher les deux éléments les plus proches que l'on agrège en un nouvel élément,
- 3/- Calculer les distances entre le nouvel élément et les éléments restants. On se trouve dans les mêmes conditions qu'à l'étape 1, avec seulement $(n - 1)$ éléments à classer,

- 4/- Chercher de nouveau les deux éléments les plus proches, que l'on agrège. On calcule les nouvelles distances, et on réitère le processus jusqu'à l'obtention d'un seul élément regroupant tous les n éléments de l'ensemble E .

La CAH produit un arbre binaire de classification (dendrogramme) (Figure A.2.2.1) contenant $n-1$ partitions, dont la racine correspond à la classe regroupant l'ensemble des individus. Ce dendrogramme représente une hiérarchie de partitions, une partition étant obtenue par troncature du dendrogramme à un certain niveau de ressemblance. Chaque troncature d'arbre fournit une partition, ayant d'autant moins de classes et des classes d'autant moins homogènes que l'on coupe plus haut.

Il existe de nombreuses mesures de ressemblances (similarités ou dissimilarités) (ou bien d'agrégation), et plusieurs méthodes pour recalculer la ressemblance lorsque l'algorithme forme des groupes (critères d'agrégations). Dans la présente étude, la distance d'agrégation dite du lien complet ou *complete linkage* ou agrégation par le diamètre est utilisée. C'est une bonne méthode pour respecter l'homogénéité des classes formées. La distance d'agrégation du lien complet considère la distance entre deux classes comme étant la plus grande des distances entre toutes les paires d'individus des deux classes. Cette méthode a tendance à constituer des classes compactes. Mathématiquement la distance d'agrégation du lien complet est donnée par l'expression A.2.2.10 avec A et B sont deux éléments, appartenant à l'ensemble E , à agréger.

$$D(A, B) = \max_{a \in A, b \in B} (d(a, b)) \quad [A.2.2.10]$$

ANNEXE A.2.3. CALCUL DE CONTRAINTES ARTICULAIRES POUR LE PROBLEME DE CINEMATIQUE INVERSE

Les résultats d'application de l'AFCM sur les angles articulaires des sujets de chaque stratégie sur les deux véhicules sont présentés. Cette étude permet de distinguer les angles articulaires les plus pertinents pour chaque stratégie (lors de passage d'un véhicule à autre) et par conséquent elle permet d'orienter le choix de contraintes articulaires à propos des variations admissibles ε_j (Cf. § 2.6.2.3 du chapitre II).

Application de l'AFCM aux angles articulaires de stratégie LS

L'AFCM est appliquée aux angles articulaires normalisés définissant l'orientation spatiale de chaque chaîne cinématique de notre modèle (calculés avec le bassin comme racine). Les sujets considérés sont ceux adaptant la stratégie LS (Cf. Chapitre 4). Les tableaux A.2.3.1, A.2.3.2 et A.2.3.3 présentent les contributions relatives des différents angles articulaires dans la construction des 2 axes du premier plan factoriel (représentant respectivement 73.54%, 75.40% et 79.26% de la variance totale) respectivement pour la chaîne « membre inférieur droit », la chaîne « membre inférieur gauche » et la chaîne « tronc + Tête ».

	Axe 1	Axe 2
	Contribution relative	
	Contribution relative (%)	(%)
Flexion/extension de la hanche	34.65	25.387
Abduction/adduction de la hanche	2.7427	9.2898
Rotation interne/externe de la hanche	3.9349	27.634
Flexion/extension du genou	52.515	33.464
Rotation interne/externe du genou	3.3741	0.058922
Flexion/extension de la cheville	1.6828	4.1525
Abduction/adduction de la cheville	1.1001	0.0141

Tableau A.2.3.1. Contributions relatives des angles articulaires définissant l'orientation spatiale de la chaîne « membre inférieur droit » dans la constitution des 2 axes du premier plan factoriel pour la stratégie LS.

	Axe 1	Axe 2
	Contribution relative (%)	Contribution relative (%)
Flexion/extension de la hanche	66.114	6.6818
Abduction/adduction de la hanche	0.52162	3.4355
Rotation interne/externe de la hanche	5.2355	2.6239
Flexion/extension du genou	24.096	50.227
Rotation interne/externe du genou	0.19004	10.159
Flexion/extension de la cheville	1.2701	13.383
Abduction/adduction de la cheville	2.5726	13.489

Tableau A.2.3.2. Contributions relatives des angles articulaires définissant l'orientation spatiale de la chaîne « membre inférieur gauche » dans la constitution des 2 axes du premier plan factoriel pour la stratégie LS

	Axe 1	Axe 2
	Contribution relative (%)	Contribution relative (%)
Flexion/extension du tronc	68.208	1.0824
Abduction/adduction du tronc	0.10276	4.2303
Rotation interne/externe du tronc	1.139	0.20916
Flexion/extension du cou	11.361	5.9561
Abduction/adduction du cou	10.618	37.876
Rotation interne/externe du cou	8.5711	50.646

Tableau A.2.3.3. Contributions relatives des angles articulaires définissant l'orientation spatiale de la chaîne « Tronc + Tête » dans la constitution des 2 axes du premier plan factoriel pour la stratégie LS.

Les angles articulaires pertinents, pour le passage entre le petit et le grand véhicule, pour la stratégie LS sont: la flexion/extension de la hanche droite, la rotation interne/externe de la hanche droite, la flexion/extension du genou droit, la flexion/extension de la hanche gauche, la flexion/extension du genou gauche, la rotation interne/externe du genou gauche, la flexion/extension de la cheville gauche, abduction/adduction de la cheville gauche, la flexion/extension du tronc, la flexion/extension du cou, l'abduction/adduction du cou et la rotation interne/externe Cou.

Sur la base des résultats obtenus de l'application de l'AFCM, les contraintes articulaires suivantes sont choisies :

Articulation	Valeur de ε_j
Hanche droite/gauche	
- Flexion/Extension	55°
- Abduction/Adduction	10°
-Rotation interne/externe	15°
Genou droit/gauche	
- Flexion/Extension	60°
- Rotation interne/externe	2°
Cheville droite/gauche	
- Flexion/Extension	5°
- Abduction/Adduction	5°

Tableau A.2.3.4. Valeur de tolérance pour chaque articulation des chaînes de membre inférieur droit pour la stratégie LS

Articulation	Valeur de ε_j
Hanche droite/gauche	
- Flexion/Extension	55°
- Abduction/Adduction	5°
-Rotation interne/externe	5°
Genou droit/gauche	
- Flexion/Extension	60°
- Rotation interne/externe	12°
Cheville droite/gauche	
- Flexion/Extension	15°
- Abduction/Adduction	15°

Tableau A.2.3.5. Valeur de tolérance pour chaque articulation des chaînes de membre inférieur gauche pour la stratégie LS

Articulation	Valeur de ε_j
Articulation reliant les deux parties du tronc (à hauteur de T10)	
- Flexion/Extension	19°
- Abduction/Adduction	5°
- Rotation interne/externe	5°
Articulation reliant le tronc à la tête	
- Flexion/Extension	23°

- Abduction/Adduction	17°
- Rotation interne/externe	13°

Tableau A.2.3.6. *Valeur de tolérance pour chaque articulation de la chaîne rassemblant le tronc et la tête pour la stratégie LS*

Application de l'AFCM aux angles articulaires de stratégie MM

L'AFCM est appliquée aux angles articulaires normalisés définissant l'orientation spatiale de chaque chaîne cinématique de notre modèle (calculés avec le bassin comme racine). Les sujets considérés sont ceux adaptant la stratégie MM (Cf. Tableau 4.12). Les tableaux A.2.3.7, A.2.3.8 et A.2.3.9 présentent les contributions relatives des différents angles articulaires dans la construction des 2 axes du premier plan factoriel (représentant respectivement 76.62%, 79.58% et 73.65% de la variance totale) respectivement pour la chaîne « membre inférieur droit », la chaîne « membre inférieur gauche » et la chaîne « tronc + Tête ».

	Axe 1	Axe 2
	Contribution relative (%)	
	Contribution relative (%)	
Flexion/extension de la hanche	27.507	46.848
Abduction/adduction de la hanche	0.025022	15.161
Rotation interne/externe de la hanche	0.50163	0.022392
Flexion/extension du genou	71.662	15.176
Rotation interne/externe du genou	0.020103	0.71889
Flexion/extension de la cheville	0.26068	21.73
Abduction/adduction de la cheville	0.024012	0.34401

Tableau A.2.3.7. *Contributions relatives des angles articulaires définissant l'orientation spatiale de la chaîne « membre inférieur droit » dans la constitution des 2 axes du premier plan factoriel pour la stratégie MM.*

	Axe 1	Axe 2
	Contribution relative (%)	
		(%)
Flexion/extension de la hanche	51.476	4.4069
Abduction/adduction de la hanche	1.9717	12.47
Rotation interne/externe de la hanche	8.1243	2.5559
Flexion/extension du genou	38.178	3.677
Rotation interne/externe du genou	0.15309	57.094
Flexion/extension de la cheville	0.092467	1.9263
Abduction/adduction de la cheville	0	17.871

Tableau A.2.3.8. Contributions relatives des angles articulaires définissant l'orientation spatiale de la chaîne « membre inférieur gauche » dans la constitution des 2 axes du premier plan factoriel pour la stratégie MM

	Axe 1	Axe 2
	Contribution relative (%)	
		(%)
Flexion/extension du tronc	12.054	50.914
Abduction/adduction du tronc	1.5711	1.1696
Rotation interne/externe du tronc	5.7341	2.1896
Flexion/extension du cou	0.21847	31.277
Abduction/adduction du cou	3.951	9.7304
Rotation interne/externe du cou	76.471	4.7202

Tableau A.2.3.9. Contributions relatives des angles articulaires définissant l'orientation spatiale de la chaîne « Tronc + Tête » dans la constitution des 2 axes du premier plan factoriel pour la stratégie MM.

Les angles articulaires pertinents, pour le passage entre le petit et le grand véhicule, pour la stratégie MM sont: la flexion/extension de la hanche droite, abduction/adduction de la hanche droite, la flexion/extension du genou droit, la flexion/extension de la cheville droite, la flexion/extension de la hanche gauche, abduction/adduction de la hanche gauche, la flexion/extension du genou gauche, la rotation interne/externe du genou gauche, abduction/adduction de la cheville gauche, la flexion/extension du tronc, la flexion/extension du cou et la rotation interne/externe Cou.

Sur la base des résultats obtenus de l'application de l'AFCM, les contraintes articulaires suivantes sont choisies :

Articulation	Valeur de ε_j
Hanche droite/gauche	
- Flexion/Extension	55°
- Abduction/Adduction	15°
-Rotation interne/externe	5°
Genou droit/gauche	
- Flexion/Extension	60°
- Rotation interne/externe	2°
Cheville droite/gauche	
- Flexion/Extension	15°
- Abduction/Adduction	5°

Tableau A.2.3.10. Valeur de tolérance pour chaque articulation des chaînes de membre inférieur droit pour la stratégie MM

Articulation	Valeur de ε_j
Hanche droite/gauche	
- Flexion/Extension	55°
- Abduction/Adduction	15°
-Rotation interne/externe	5°
Genou droit/gauche	
- Flexion/Extension	60°
- Rotation interne/externe	12°
Cheville droite/gauche	
- Flexion/Extension	5°
- Abduction/Adduction	15°

Tableau A.2.3.11. Valeur de tolérance pour chaque articulation des chaînes de membre inférieur gauche pour la stratégie MM

Articulation	Valeur de ε_j
Articulation reliant les deux parties du tronc (à hauteur de T10)	
- Flexion/Extension	19°
- Abduction/Adduction	5°
- Rotation interne/externe	5°
Articulation reliant le tronc à la tête	
- Flexion/Extension	23°

- Abduction/Adduction	5°
- Rotation interne/externe	17°

Tableau A.2.3.12. Valeur de tolérance pour chaque articulation de la chaîne rassemblant le tronc et la tête pour la stratégie MM

Application de l'AFCM aux angles articulaires de stratégie TB

L'AFCM est appliquée aux angles articulaires normalisés définissant l'orientation spatiale de chaque chaîne cinématique de notre modèle (calculés avec le bassin comme racine). Les sujets considérés sont ceux adaptant la stratégie TB (Cf. Tableau 4.12). Les tableaux A.2.3.13, A.2.3.14 et A.2.3.15 présentent les contributions relatives des différents angles articulaires dans la construction des 2 axes du premier plan factoriel (représentant respectivement 80.52%, 80.01% et 74.14% de la variance totale) respectivement pour la chaîne « membre inférieur droit », la chaîne « membre inférieur gauche » et la chaîne « tronc + Tête ».

	Axe 1	Axe 2
	Contribution relative (%)	
	Contribution relative (%)	
Flexion/extension de la hanche	63.663	0.054874
Abduction/adduction de la hanche	0.016629	0.58176
Rotation interne/externe de la hanche	0.048535	0.87496
Flexion/extension du genou	28.321	8.1514
Rotation interne/externe du genou	3.8201	71.704
Flexion/extension de la cheville	4.058	0.9704
Abduction/adduction de la cheville	0.072712	17.663

Tableau A.2.3.13. Contributions relatives des angles articulaires définissant l'orientation spatiale de la chaîne « membre inférieur droit » dans la constitution des 2 axes du premier plan factoriel pour la stratégie TB.

	Axe 1	Axe 2
	Contribution relative (%)	
	Contribution relative (%)	
Flexion/extension de la hanche	49.046	5.6916
Abduction/adduction de la hanche	0.35789	0.034586

Rotation interne/externe de la hanche	5.1503	0.63469
Flexion/extension du genou	44.356	1.8561
Rotation interne/externe du genou	0.56294	50.092
Flexion/extension de la cheville	0	12.286
Abduction/adduction de la cheville	0.51766	29.405

Tableau A.2.3.14. Contributions relatives des angles articulaires définissant l'orientation spatiale de la chaîne « membre inférieur gauche » dans la constitution des 2 axes du premier plan factoriel pour la stratégie TB

	Axe 1	Axe 2
	Contribution relative (%)	Contribution relative (%)
Flexion/extension du tronc	73.807	0.66497
Abduction/adduction du tronc	0.57219	9.1122
Rotation interne/externe du tronc	0.031503	16.05
Flexion/extension du cou	7.7873	17.349
Abduction/adduction du cou	14.224	2.7832
Rotation interne/externe du cou	3.5774	54.04

Tableau A.2.3.15. Contributions relatives des angles articulaires définissant l'orientation spatiale de la chaîne « Tronc + Tête » dans la constitution des 2 axes du premier plan factoriel pour la stratégie TB.

Les angles articulaires pertinents, pour le passage entre le petit et le grand véhicule, pour la stratégie TB sont: la flexion/extension de la hanche droite, la flexion/extension du genou droit, la rotation interne/externe du genou droit, , abduction/adduction de la cheville droite, la flexion/extension de la hanche gauche, la flexion/extension du genou gauche, la rotation interne/externe du genou gauche, la flexion/extension de la cheville gauche, abduction/adduction de la cheville gauche, la flexion/extension du tronc, la rotation interne/externe tronc, la flexion/extension du cou, abduction/adduction du cou et la rotation interne/externe du cou.

Sur la base des résultats obtenus de l'application de l'AFCM, les contraintes articulaires suivantes sont choisies :

Articulation	Valeur de ε_j
Hanche droite/gauche	
- Flexion/Extension	55°
- Abduction/Adduction	5°
-Rotation interne/externe	5°
Genou droit/gauche	
- Flexion/Extension	60°
- Rotation interne/externe	12°
Cheville droite/gauche	
- Flexion/Extension	5°
- Abduction/Adduction	15°

Tableau A.2.3.16. Valeur de tolérance pour chaque articulation des chaînes de membre inférieur droit pour la stratégie TB

Articulation	Valeur de ε_j
Hanche droite/gauche	
- Flexion/Extension	55°
- Abduction/Adduction	5°
-Rotation interne/externe	15°
Genou droit/gauche	
- Flexion/Extension	60°
- Rotation interne/externe	12°
Cheville droite/gauche	
- Flexion/Extension	15°
- Abduction/Adduction	15°

Tableau A.2.3.17. Valeur de tolérance pour chaque articulation des chaînes de membre inférieur gauche pour la stratégie TB

Articulation	Valeur de ε_j
Articulation reliant les deux parties du tronc (à hauteur de T10)	
- Flexion/Extension	19°
- Abduction/Adduction	5°
- Rotation interne/externe	5°
Articulation reliant le tronc à la tête	
- Flexion/Extension	23°
- Abduction/Adduction	15°
- Rotation interne/externe	17°

Tableau A.2.3.18. Valeur de tolérance pour chaque articulation de la chaîne rassemblant le tronc et la tête pour la stratégie TB

Application de l'AFCM aux angles articulaires de stratégie TF

L'AFCM est appliquée aux angles articulaires normalisés définissant l'orientation spatiale de chaque chaîne cinématique de notre modèle (calculés avec le bassin comme racine). Les sujets considérés sont ceux adaptant la stratégie TF (Cf. Tableau 4.12). Les tableaux A.2.3.19, A.2.3.20 et A.2.3.21 présentent les contributions relatives des différents angles articulaires dans la construction des 2 axes du premier plan factoriel (représentant respectivement 88.07%, 83.90% et 83.06% de la variance totale) respectivement pour la chaîne « membre inférieur droit », la chaîne « membre inférieur gauche » et la chaîne « tronc + Tête ».

	Axe 1	Axe 2
	Contribution relative (%)	
	Contribution relative (%)	Contribution relative (%)
Flexion/extension de la hanche	67.474	8.8454
Abduction/adduction de la hanche	1.7114	0.50315
Rotation interne/externe de la hanche	2.7712	17.831
Flexion/extension du genou	26.561	18.031
Rotation interne/externe du genou	0.14033	0
Flexion/extension de la cheville	1.2353	37.292
Abduction/adduction de la cheville	0.1067	17.497

Tableau A.2.3.19. Contributions relatives des angles articulaires définissant l'orientation spatiale de la chaîne « membre inférieur droit » dans la constitution des 2 axes du premier plan factoriel pour la stratégie TF.

	Axe 1	Axe 2
	Contribution relative (%)	
	Contribution relative (%)	Contribution relative (%)
Flexion/extension de la hanche	51.452	11.385
Abduction/adduction de la hanche	0.06951	18.558
Rotation interne/externe de la hanche	1.76	0.83146

Flexion/extension du genou	40.421	32.255
Rotation interne/externe du genou	3.4478	7.8551
Flexion/extension de la cheville	0.83956	5.6611
Abduction/adduction de la cheville	2.01	23.455

Tableau A.2.3.20. Contributions relatives des angles articulaires définissant l'orientation spatiale de la chaîne « membre inférieur gauche » dans la constitution des 2 axes du premier plan factoriel pour la stratégie TF

	Axe 1	Axe 2
	Contribution relative (%)	Contribution relative (%)
Flexion/extension du tronc	71.721	4.1769
Abduction/adduction du tronc	0.10625	0.011653
Rotation interne/externe du tronc	2.5406	27.418
Flexion/extension du cou	19.659	1.5879
Abduction/adduction du cou	5.695	0.16394
Rotation interne/externe du cou	0.27823	66.641

Tableau A.2.3.21. Contributions relatives des angles articulaires définissant l'orientation spatiale de la chaîne « Tronc + Tête » dans la constitution des 2 axes du premier plan factoriel pour la stratégie TF.

Les angles articulaires pertinents, pour le passage entre le petit et le grand véhicule, pour la stratégie TF sont: la flexion/extension de la hanche droite, la rotation interne/externe de la hanche droite, la flexion/extension du genou droit, la flexion/extension de la cheville droite, abduction/adduction de la cheville droite, la flexion/extension de la hanche gauche, abduction/adduction de la hanche gauche, la flexion/extension du genou gauche, abduction/adduction de la cheville gauche, la flexion/extension du tronc, la rotation interne/externe du tronc, la flexion/extension du cou, et la rotation interne/externe du cou.

Sur la base des résultats obtenus de l'application de l'AFCM, les contraintes articulaires suivantes sont choisies :

Articulation	Valeur de ε_j
Hanche droite/gauche	
- Flexion/Extension	55°
- Abduction/Adduction	5°
-Rotation interne/externe	15°
Genou droit/gauche	
- Flexion/Extension	60°
- Rotation interne/externe	2°
Cheville droite/gauche	
- Flexion/Extension	15°
- Abduction/Adduction	15°

Tableau A.2.3.22. Valeur de tolérance pour chaque articulation des chaînes de membre inférieur droit pour la stratégie TF

Articulation	Valeur de ε_j
Hanche droite/gauche	
- Flexion/Extension	55°
- Abduction/Adduction	15°
-Rotation interne/externe	5°
Genou droit/gauche	
- Flexion/Extension	60°
- Rotation interne/externe	2°
Cheville droite/gauche	
- Flexion/Extension	5°
- Abduction/Adduction	15°

Tableau A.2.3.23. Valeur de tolérance pour chaque articulation des chaînes de membre inférieur gauche pour la stratégie TF

Articulation	Valeur de ε_j
Articulation reliant les deux parties du tronc (à hauteur de T10)	
- Flexion/Extension	19°
- Abduction/Adduction	5°
- Rotation interne/externe	15°
Articulation reliant le tronc à la tête	
- Flexion/Extension	23°
- Abduction/Adduction	5°
- Rotation interne/externe	17°

Tableau A.2.3.24. *Valeur de tolérance pour chaque articulation de la chaîne rassemblant le tronc et la tête pour la stratégie TF*

Remarque : Les contraintes pour les stratégies FM et BM (Cf. Chapitre 4) ne sont pas déterminées. En effet, ces stratégies apparaissent uniquement sur un des deux véhicules et non pas sur les deux. Du coup une étude discriminante pour les angles des deux stratégies n'était pas possible.

ANNEXE A.3.1 CARACTERISTIQUES DES SUJETS RETENUS DANS LA PRESENTE ETUDE

1 Les sujets retenus sur le petit véhicule

Sujet.	Nombre.	Ages (années)	Tailles (mm)	Poids (kg)	Sexe	
					M	F
Jeune Sain	8	26±5	1758±134	70±11	6	2
Agé Sain	16	71±4	1660±98	74±16	9	7
Déficient	9	59±12	1771±94	84±20	7	2
Total	33	58±19	1713±113	76±17	23	10

Tableau A.3.1.1. Synthèse des sujets retenus sur le petit véhicule.

Sujet.	Nombre	Ages (Années)	Tailles (mm)	Poids (kg)	Sexe	
					M	F
Prothèse Hanche Droite	5	58±15	1742 ±72	73± 16	3	2
Prothèse Hanche Gauche	1	59	1870	91	1	-
Prothèse Genou Gauche	2	59±16	1750±78	85	2	-
Prothèse des 2 hanches	1	60	171	128	1	-
Total	9	59±12	1771±94	84±20	7	2

Tableau A.3.1.2. Synthèse des sujets munis d'une prothèse retenus sur le petit véhicule.

2 Les sujets retenus sur le grand véhicule

Sujet.	Nombre.	Ages (années)	Tailles (mm)	Poids (kg)	Sexe	
					M	F
Jeune Sain	8	26±5	1758±134	70±11	6	2
Agé Sain	17	71±4	1641±124	74±16	10	7
Déficient	12	62±13	1775±86	88±19	10	2
Total	37	60±19	1708±127	78±17	26	11


Tableau A.3.1.3. Synthèse des sujets retenus sur le grand véhicule.

Sujet.	Nombre	Ages (Années)	Tailles (mm)	Poids (kg)	Sexe	
					M	F
Prothèse Hanche Droite	5	58±15	1742 ±72	73± 16	3	2
Prothèse Hanche Gauche	2	59±1	1865±7	98±9	2	-
Prothèse Genou Gauche	3	64±15	1777±55	89±7	3	-
Prothèse Genou Droit	1	84	172	102	1	-
Prothèse des 2 hanches	1	60	171	128	1	-
Total	12	62±13	1775±86	88±19	10	2






Tableau A.3.1.4. Synthèse des sujets munis d'une prothèse retenus sur le grand véhicule.

ANNEXE A.3.2 MESURES ANTHROPOMETRIQUES

Pour chaque sujet, il est mesuré :

		
Circonférence tête	Circonférence haut bras	Circonférence bras
		
Circonférence coude	Circonférence avant-bras	Circonférence poignet
		
Circonférence carpe	Circonférence taille	Circonférence haut cuisse
		
Circonférence cuisse	Circonférence genou	Circonférence mollet
		
Circonférence cheville	Circonférence talon	Circonférence coup de pied

		
Largeur T12	Largeur L5	Largeur hanche
		
Largeur trochanter	Epaisseur trochanter	Epaisseur L5
		
Epaisseur T12	Epaisseur poitrine	Epaisseur acromion
		
Longueur bras	Longueur avant bras	Longueur main
		
Longueur thorax	Longueur abdominaux	Longueur cuisse

		
Longueur jambe	Longueur pied	Hauteur buste (assis)
		Distance inter – tempe mesurée par le pied à coulisse
Hauteur jambe (assis)	Distance siège-tête (assis)	Largeur tête
Distance entre le vertex et le menton mesurée par le pied à coulisse	Distance inter – acromion mesurée par le pied à coulisse	Distance entre les bords externes des épaules de ce qui forme la carrure mesurée par le pied à coulisse
Hauteur tête	Largeur acromion	Largeur épaule
Largeur de la cage thoracique au niveau de la poitrine mesurée par le pied à coulisse		
Largeur poitrine		

La masse et la stature sont également relevées (soit par questionnement ou soit par mesure), ainsi que la longueur du tronc en position debout (distance entre les épines iliaques et le manubrium).

ANNEXE A.3.3 LA METHODE DE SPHERE FITTING

La méthode fonctionnelle dite de sphere fitting procède en deux étapes :

- Première étape

Cette étape consiste à estimer la position du centre articulaire de la hanche ${}^B H$ dans le repère local lié au bassin construit à partir des données issues de la circumduction de chaque jambe (Cf. §3.2.3 du chapitre 3). Le repère local lié au bassin est construit comme suit :

$(O_B, \bar{X}_B, \bar{Y}_B, \bar{Z}_B)$ (Cf. Fig. A.3.3.1)

Avec

O_B : L'origine du repère, coïncide avec le marqueur apposé à hauteur de la vertèbre L5.

\bar{Z}_B : Un vecteur formé par les composantes des marqueurs positionnés sur les deux épines iliaques et dont la sens est de l'épine iliaque gauche vers l'épine iliaque droite.

\bar{Y}_B : Est le vecteur résultant du produit vectoriel entre le vecteur \bar{Z}_B et un vecteur intermédiaire qui va de L5 vers le marqueur pubis.

\bar{X}_B : Est le vecteur résultant du produit vectoriel entre le vecteur \bar{Y}_B et \bar{Z}_B .

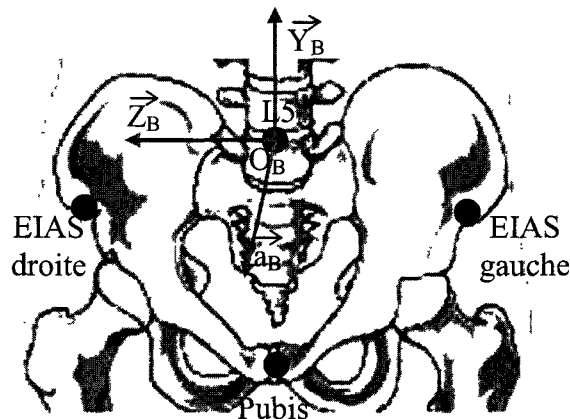


Figure A.3.3.1. Repère $(L5, X_B, Y_B, Z_B)$ lié au bassin.

L'estimation du centre articulaire de la hanche se fait en utilisant l'algorithme de Gamage et Lasenby (2002), qui consiste à minimiser la fonction F suivante :

$$F = \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N \left(|r_{ji} - r_c| - \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N |r_{jk} - r_c| \right)^2 \quad [A.3.3.1]$$

Avec M le nombre de marqueurs apposés sur chaque cuisse (2 dans notre étude), N la durée totale du mouvement de circumduction, r_{ji} la position du marqueur j à l'instant i et r_c le centre articulaire recherché (Cf. Fig. A.3.3.2).

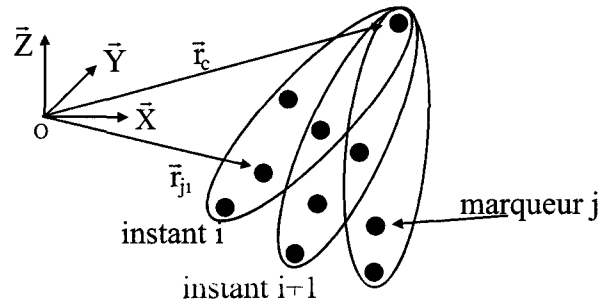


Figure A.3.3.2. Centre articulaire de la hanche.

Enfin la position du centre articulaire de la hanche est exprimée dans le repère lié au bassin par l'expression suivante :

$${}^B H = {}^L T_B^{-1} \times {}^L H \quad [A.3.3.2]$$

- Deuxième étape

Cette étape consiste à exprimer la position du centre articulaire de la hanche pour chaque mouvement d'entrée enregistré à chaque pas de temps. On construit des repères identiques au repère utilisé dans la première étape (Cf. Fig. A.3.3.1) (avec L5(t), la position estimée du marqueur L5, pris comme origine). On exprime la position du centre articulaire de chaque hanche à l'aide de l'expression suivante :

$${}^L H(t) = {}^L T_B(t) \times {}^B H \quad [A.3.3.3]$$

Avec ${}^L H(t)$ la position tridimensionnelle du centre articulaire de la hanche pour chaque mouvement d'entrée à chaque pas de temps (la donnée recherchée), ${}^L T_B(t)$ la matrice homogène donnant l'orientation spatiale du repère lié au bassin dans le repère lié au laboratoire à chaque pas de temps (donnée connue) et H_B la position tridimensionnelle de la hanche dans le repère lié au bassin (donnée calculé lors de la première étape).

ANNEXE A.3.4 LES STRATEGIES ISSUES DE L'OBSERVATION

La synthèse des stratégies, identifiées par observation, adoptées par les sujets impliqués dans le projet HANDIMAN (RNTS 2004) est présentée dans le tableau A.3.4.1.

Subject	Gender	Age (years)	Body height (cm)	Body weight (kg)	Physical condition	Small car		Medium car		Minivan		Small utility	
						Ing	Egr	Ing	Egr	Ing	Egr	Ing	Egr
1	M	33	167,5	71,5	-	LS	HF	LS	HF	LS	HF	LS	HF
2	M	19	194	70	-	BM	HF	BM	HF	BM	HF	BM	HF
3	F	27	155	53,5	-	BM	HF	BM	HF	FM	TFE	BM	HF
4	F	28	175	74	-	BM	HF	BM	HF	BM	HF	BM	HF
5	M	23	181	74	-	LS	PC	LS	PC	LS	PC	LS	PC
6	M	74	169	81,8	-	LS	HF	LS	HF	LS	HF	LS	HF
7	M	59	187	91	LHP	TF	TFE	TF	TFE	TF	TFE	TF	TFE
8	F	68	161	74	LKP	BM	HF	BM	HF	BM	HF	BM	HF
9	M	73	178	72	-	BM	HF	LS	HF	LS	HF	LS	HF
10	M	70	174	100	-	LS	PC	LS	PC	LS	PC	LS	PC
11	F	68	154	60	-	LS	TFE	LS	PC	FM	HF	LS	PC
12	M	75	195	90	RHP	LS	HF	LS	PC	LS	HF	LS	HF
13	M	68	170	97	-	LS	HF	LS	HF	LS	HF	LS	HF
14	M	84	172	102	RKP	LS	TFE	LS	HF	FM	HF	LS	TFE
15	M	75	178	97,1	LKP	BM	TFE	BM	TFE	BM	TFE	BM	TFE
16	M	52	172	67,4	RHP	TB	TFE	TB	TFE	TB	TFE	TB	TFE
17	F	67	166	57	RHP	LS	HF	LS	HF	LS	HF	LS	HF
18	M	22	169	61	-	BM	HF	BM	HF	LS	HF	LS	HF
19	M	70	172	85	-	LS	TFE	LS	TFE	FM	TFE	LS	TFE
20	F	66	156	62	-	LS	HF	LS	HF	LS	TFE	LS	TFE
21	M	67	172	74	-	LS	HF	LS	HF	LS	HF	LS	HF
22	M	47	183	85	LKP	TB	HF	TB	HF	TB	HF	TB	HF
23	M	68	185	98	-	TF	TFE	TF	TFE	TF	TFE	TF	TFE
24	M	64	170	70	-	BM	HF	BM	HF	BM	HF	BM	HF
25	F	72	154	65	-	BM	HF	BM	HF	LS	HF	BM	HF
26	M	72	175	92	-	LS	PC	LS	PC	LS	PC	LS	PC
27	M	71	170	70	-	LS	PC	LS	PC	LS	PC	LS	PC
28	F	65	158	62	-	BM	HF	BM	HF	BM	HF	BM	HF
29	M	72	133	73	-	LS	HF	LS	HF	FM	HF	LS	HF
30	M	35	189	89	-	TB	HF	TB	HF	TB	HF	TB	HF
31	M	35	177	78	RHP	LS	PC	LS	PC	LS	PC	LS	PC
32	F	68	163	66	(RH+RK+LH) P	TF	TFE	TF	TFE	TF	TFE	TF	TFE
33	M	69	164	78	-	LS	HF	LS	HF	LS	PC	LS	HF
34	M	60	171	128	RHP+LHP	LS	TFE	LS	TFE	LS	PC	LS	PC
35	F	75	160	48,5	-	BM	HF	BM	HF	BM	HF	BM	HF
36	M	82	175,5	83	-	BM	HF	LS	HF	LS	HF	LS	HF
37	F	62	171	75	RHP	TF	TFE	TF	TFE	TF	TFE	TF	TFE
38	M	58	186	104	LHP	TF	TFE	LS	HF	LS	HF	LS	HF
39	F	42	170	77	LHP+RHP	TF	TFE	TF	TFE	TF	TFE	TF	TFE
40	F	70	160	57	-	BM	HF	TF	HF	BM	HF	BM	HF
41	F	78	155	57	-	LS	TFE	LS	TFE	LS	TFE	LS	TFE

Tableau A.3.4.1. Les stratégies identifiées de tous les sujets.

Entrée avec une stratégie à un pied et sortie avec une stratégie à deux pieds

~~TF~~ : Entrée avec une stratégie à deux pieds et sortie avec une stratégie à un pied

En gras : change de stratégie d'entrée (ou bien de sortie)

RHP: Right hip prosthesis, RKP: Right knee prosthesis, LHP: Left hip prosthesis, LKP: Left knee prosthesis, LS: Lateral sliding, FM: Forward motion, BM: Backward motion, TF: Trunk forward, TB: Trunk backward, HF: Head forward, PC: Parallel to the cockpit, TFE: Two-FeetEgress. Ing: Ingress, Egr: Egress.

ANNEXE A.4.1 LES STRATEGIES ISSUES DE LA CLASSIFICATION AUTOMATIQUE

Les différentes stratégies identifiées sont résumées dans le tableau A.4.1.

Subject	Gender	Age (years)	Body height (cm)	Body weight (kg)	Physical condition	Small car	Minivan
						Ingress	Ingress
1	M	33	167,5	71.5	-	MM	MM
2	M	19	194	70	-	BM	MM
3	F	27	155	53.5	-	BM	FM
4	F	28	175	74	-	BM	MM
5	M	23	181	74	-	MM	LS
6	M	74	169	81.8	-	MM	MM
7	M	59	187	91	LHP	TF	TF
9	M	73	178	72	-	MM	MM
10	M	70	174	100	-	LS	LS
11	F	68	154	60	-	MM	FM
12	M	75	195	90	RHP	LS	LS
13	M	68	170	97	-	MM	MM
14	M	84	172	102	RKP	-	FM
15	M	75	178	97.1	LKP	-	MM
16	M	52	172	67.4	RHP	TB	TB
17	F	67	166	57	RHP	MM	MM
18	M	22	169	61	-	BM	BM
19	M	70	172	85	-	MM	FM
20	F	66	156	62	-	MM	MM
22	M	47	183	85	LKP	TB	TB
23	M	68	185	98	-	TF	TF
24	M	64	170	70	-	MM	MM
25	F	72	154	65	-	MM	MM
26	M	72	175	92	-	LS	LS
27	M	71	170	70	-	MM	MM
28	F	65	158	62	-	BM	MM
29	M	72	133	73	-	-	FM
30	M	35	189	89	-	TB	TB
31	M	35	177	78	RHP	LS	LS
33	M	69	164	78	-	MM	MM
34	M	60	171	128	RHP+LHP	LS	LS
35	F	75	160	48.5	-	BM	MM
36	M	82	175.5	83	-	MM	MM
37	F	62	171	75	RHP	TF	TF
38	M	58	186	104	LHP	-	MM
40	F	70	160	57	-	BM	MM
41	F	78	155	57	-	MM	MM

Tableau A.4.1. *Sous- stratégies adoptées par les sujets.*

En gras : change de stratégie d'entrée

RHP: Right hip prosthesis, RKP: Right knee prosthesis, LHP: Left hip prosthesis, LKP: Left knee prosthesis. Abbreviations used in the Small Car and Minivan columns: LS: Lateral sliding, FM: Forward motion, BM: Backward motion, TF: Trunk forward, TB: Trunk backward, MM: median motion strategy.

ANNEXE A.4.2 LIMITES ARTICULAIRES RETENUES EN FONCTION DES SOUS-STRATEGIES

La présente annexe présente les limites articulaires (maxima et minima) des angles pertinents pour chaque stratégie d'entrée identifiée et cela chaque 25% du mouvement.

1 Limites articulaires des sous- stratégies identifiées sur le petit véhicule

Angles articulaires	Pourcentage du mouvement	Lateral Sliding		Backward Motion		Median Motion		Trunk Backward		Trunk Forward	
		Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Flexion/Extension Tronc	0%	-40°	1°	-32°	3°	-35°	19°	-58°	-7°	-54°	-29°
	25%	-43°	-25°	-51°	6°	-30°	5°	-32°	-17°	-98°	-45°
	50%	-61°	-11°	-62°	0°	-35°	9°	-41°	-8°	-88°	-2°
	75%	-50°	82°	-82°	-4°	-77°	-3°	-54°	0°	-50°	44°
	100%	-53°	98°	-64°	64°	-63°	-4°	-50°	-12°	-41°	57°
Rotation Interne/ Externe Tronc	0%	-17°	25°	-3°	29°	-36°	30°	7°	9°	6°	18°
	25%	-12°	28°	-1°	30°	-33°	21°	-20°	-2°	-17°	0°
	50%	2°	23°	-17°	24°	-50°	10°	-28°	5°	-44°	0°
	75%	-15°	29°	-27°	12°	-53°	23°	-33°	-7°	-43°	-16°
	100%	-2°	61°	-23°	7°	-105°	16°	-26°	-22°	-30°	-19°
Flexion/Extension hanche droite	0%	-18°	18°	-46°	17°	-56°	27°	-58°	-2°	-57°	-23°
	25%	39°	80°	29°	120°	43°	99°	20°	86°	-34°	6°
	50%	20°	66°	9°	91°	43°	93°	31°	130°	-9°	110°
	75%	34°	144°	54°	95°	19°	104°	52°	89°	29°	139°
	100%	54°	162°	31°	176°	20°	100°	52°	99°	46°	159°
Rotation Interne/ Externe hanche droite	0%	-30°	-6°	-24°	-5°	-28°	12°	-20°	-9°	-34°	-7°
	25%	-28°	-8°	-7°	28°	-19°	24°	-12°	-9°	-21°	0°
	50%	-54°	-25°	8°	35°	-33°	39°	-28°	0°	-33°	-4°
	75%	-62°	-29°	7°	33°	-22°	43°	-25°	49°	-50°	-18°
	100%	-45°	-8°	2°	59°	-24°	45°	-22°	-2°	-48°	-4°
Flexion/Extension genou droit	0%	-75°	-40°	-80°	-9°	-78°	1°	-39°	-33°	-39°	-23°
	25%	-104°	-48°	-140°	-48°	-118°	-38°	-98°	-53°	-58°	-39°
	50%	-59°	-17°	-106°	-54°	-83°	-6°	-86°	-49°	-104°	-69°
	75%	-92°	-50°	-131°	-65°	-115°	-35°	-77°	-63°	-104°	-94°
	100%	-91°	-54°	-113°	-70°	-124°	-59°	-88°	-79°	-94°	-68°
Flexion/Extension hanche gauche	0%	0°	38°	0°	48°	-12°	51°	-40°	31°	-11°	16°
	25%	-28°	17°	-21°	59°	-7°	53°	6°	83°	-25°	11°
	50%	-20°	59°	0°	60°	3°	88°	33°	99°	-8°	109°
	75%	-12°	128°	24°	75°	-46°	115°	59°	83°	18°	117°
	100%	7°	148°	-213°	94°	-12°	100°	33°	80°	41°	135°
Flexion/Extension genou gauche	0%	-48°	-16°	-49°	-19°	-49°	-9°	-32°	-27°	-37°	-32°
	25%	-55°	-20°	-64°	-18°	-59°	-12°	-107°	-27°	-70°	-36°
	50%	-92°	-76°	-111°	-46°	-101°	-13°	-101°	-64°	-120°	-83°
	75%	-99°	-76°	-111°	-59°	-112°	-13°	-103°	-77°	-109°	-96°
	100%	-108°	-87°	-106°	-84°	-115°	-10°	-104°	-88°	-104°	-83°
Rotation Interne/ Externe genou gauche	0%	-20°	13°	2°	40°	-9°	34°	-44°	5°	-10°	32°
	25%	-22°	0°	-7°	36°	-19°	21°	-48°	11°	-24°	20°
	50%	-15°	4°	-15°	17°	-57°	25°	-42°	18°	-4°	35°
	75%	-27°	-4°	-40°	18°	-59°	13°	-59°	6°	1°	31°
	100%	-47°	0°	-45°	19°	-33°	22°	-55°	7°	18°	24°
Abduction/ adduction cheville gauche	0%	-15°	3°	-12°	9°	-14°	10°	-6°	51°	-21°	0°
	25%	-7°	-1°	-12°	27°	-17°	24°	0°	47°	-11°	33°
	50%	-5°	12°	-5°	26°	-4°	52°	-4°	48°	-17°	33°
	75%	-19°	17°	-16°	27°	-11°	42°	-1°	56°	-21°	6°
	100%	-14°	33°	-13°	23°	-18°	29°	-4°	44°	-15°	0°
Flexion/Extension cou	0%	-33°	-23°	-53°	-10°	-50°	-6°	-44°	-28°	-39°	-14°
	25%	-35°	-21°	-42°	-11°	-51°	-9°	-36°	-19°	-30°	5°
	50%	-49°	-25°	-42°	5°	-46°	0°	-52°	-26°	-64°	-6°
	75%	-53°	-20°	-43°	0°	-67°	11°	-51°	-22°	-59°	-31°
	100%	-57°	-40°	-47°	-12°	-59°	15°	-62°	-48°	-55°	-22°
Abduction/Adduction cou	0%	-6°	11°	-5°	12°	-14°	23°	10°	24°	-5°	8°
	25%	6°	13°	-5°	32°	-17°	26°	4°	22°	-1°	18°
	50%	-9°	7°	13°	29°	2°	31°	-2°	39°	-24°	21°
	75%	-37°	-11°	-6°	25°	-24°	24°	5°	31°	-12°	-7°
	100%	-24°	-1°	-21°	7°	-66°	20°	-23°	10°	-10°	-5°

Rotation Interne/ Externe cou	0%	-33°	12°	-31°	-4°	-33°	22°	-19°	-13°	-10°	-1°
	25%	-37°	-9°	-40°	-12°	-38°	16°	-33°	-15°	-41°	-27°
	50%	-18°	-5°	-47°	-6°	-48°	19°	-26°	-15°	-27°	-23°
	75%	-24°	30°	-41°	13°	-47°	20°	-22°	-7°	-14°	-1°
	100%	-29°	-5°	-21°	-2°	-22°	92°	-5°	0°	-15°	9°

2 Limites articulaires des sous- stratégies identifiées sur le grand véhicule

Angles articulaires	Pourcentage du mouvement	Lateral Sliding		Median Motion		Forward Motion		Trunk backward		Trunk Forward	
		Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Flexion/Extension Tronc	0%	-102°	19°	-60°	17°	-31°	13°	-76°	-2°	-80°	-35°
	25%	-113°	2°	-53°	13°	-38°	0°	-83°	-7°	-69°	-44°
	50%	-32°	6°	-75°	14°	-44°	10°	-97°	-23°	-82°	-24°
	75%	-46°	76°	-70°	8°	-42°	11°	-74°	11°	-74°	38°
	100%	-63°	68°	-64°	18°	-61°	6°	-58°	-6°	-65°	22°
Flexion/Extension Hanche droite	0%	-104°	35°	-57°	52°	-50°	18°	-73°	1°	-86°	-42°
	25%	-40°	90°	40°	104°	76°	109°	-67°	20°	-48°	-14°
	50%	38°	86°	23°	112°	59°	114°	-36°	28°	-37°	83°
	75%	24°	127°	14°	105°	86°	126°	20°	97°	19°	138°
	100%	20°	141°	58°	131°	87°	105°	55°	97°	35°	130°
Abduction/ Adduction Hanche droite	0%	-8°	14°	-21°	15°	-13°	12°	1°	6°	-9°	9°
	25%	-14°	-2°	-26°	11°	-52°	0°	-2°	4°	-24°	14°
	50%	-26°	-2°	-48°	19°	-57°	3°	10°	12°	-12°	29°
	75%	-44°	5°	-55°	14°	-51°	-8°	6°	12°	0°	24°
	100%	-44°	-6°	-47°	9°	-77°	1°	-7°	16°	-30°	23°
Flexion/Extension Genou droit	0%	-56°	-24°	-83°	-18°	-36°	1°	-35°	-14°	-17°	-11°
	25%	-131°	-106°	-146°	-94°	-130°	-91°	-81°	-5°	-60°	-28°
	50%	-72°	-42°	-98°	-52°	-117°	-76°	-48°	-37°	-104°	-31°
	75%	-92°	-67°	-118°	-72°	-132°	-88°	-76°	-41°	-95°	-81°
	100%	-98°	-77°	-130°	-70°	-142°	-101°	-118°	-79°	-115°	-88°
Flexion/Extension Cheville droite	0%	57°	99°	54°	99°	71°	92°	78°	95°	81°	88°
	25%	61°	112°	46°	101°	38°	85°	61°	78°	65°	86°
	50%	44°	76°	40°	85°	43°	69°	43°	71°	45°	70°
	75%	53°	70°	32°	91°	47°	73°	35°	70°	28°	54°
	100%	53°	78°	37°	80°	50°	79°	17°	63°	23°	71°
Flexion/Extension Hanche gauche	0%	-77°	47°	-50°	46°	-44°	49°	-62°	30°	-49°	12°
	25%	-106°	24°	-49°	27°	-56°	25°	-61°	4°	-43°	-22°
	50%	-32°	32°	-69°	29°	-76°	21°	-65°	13°	-61°	48°
	75%	-21°	98°	-59°	48°	-69°	36°	-28°	67°	-16°	95°
	100%	-49°	88°	-52°	53°	-73°	25°	20°	59°	-15°	69°
Abduction/ Adduction Hanche gauche	0%	-2°	15°	-21°	21°	-25°	-4°	0°	3°	-18°	14°
	25%	6°	34°	-20°	43°	-37°	13°	-2°	6°	-19°	5°
	50%	20°	46°	-7°	60°	-17°	22°	12°	13°	-7°	22°
	75%	33°	49°	8°	70°	6°	25°	24°	37°	2°	44°
	100%	25°	57°	2°	55°	5°	37°	23°	36°	14°	44°
Flexion/Extension Genou gauche	0%	-46°	-23°	-48°	-2°	-41°	14°	-30°	-10°	-49°	-23°
	25%	-45°	-15°	-44°	-8°	-39°	64°	-31°	-3°	-42°	-7°
	50%	-60°	-36°	-69°	-8°	-42°	39°	-35°	-13°	-84°	-10°
	75%	-56°	-33°	-58°	2°	-42°	14°	-67°	-29°	-81°	-48°
	100%	-65°	-46°	-65°	-18°	-36°	-5°	-70°	-43°	-68°	-51°
Rotation Interne/ Externe Genou Gauche	0%	-20°	18°	-20°	37°	-8°	23°	-21°	19°	0°	3°
	25%	-31°	13°	-28°	34°	-25°	21°	-37°	11°	-8°	2°
	50%	-34°	18°	-60°	26°	-31°	4°	-42°	20°	-9°	23°
	75%	-67°	3°	-48°	48°	-11°	11°	-58°	-20°	-19°	9°
	100%	-51°	2°	-49°	9°	-12°	8°	-43°	-6°	-28°	13°
Flexion/Extension Cou	0%	-32°	-17°	-54°	-4°	-37°	-3°	-44°	-18°	-36°	-14°
	25%	-35°	-16°	-55°	2°	-46°	-3°	-42°	-24°	-28°	-10°
	50%	-45°	-10°	-54°	8°	-48°	-12°	-44°	-31°	-44°	-20°
	75%	-58°	-14°	-58°	17°	-51°	11°	-52°	-30°	-71°	-41°
	100%	-59°	-32°	-67°	20°	-46°	55°	-71°	-41°	-52°	-32°
Abduction/ Adduction Cou	0%	4°	11°	-18°	22°	-4°	13°	12°	20°	2°	8°
	25%	5°	23°	-17°	28°	0°	19°	10°	27°	-8°	17°
	50%	2°	30°	0°	42°	-34°	18°	18°	29°	-15°	23°
	75%	-30°	11°	-21°	30°	-39°	12°	-4°	23°	-23°	0°
	100%	-65°	4°	-28°	31°	-62°	19°	-21°	30°	-48°	-7°
Rotation Interne/ Externe Cou	0%	-28°	-5°	-35°	19°	-23°	0°	-26°	-13°	-19°	-12°
	25%	-34°	-9°	-47°	14°	-36°	1°	-37°	-21°	-44°	-16°
	50%	-25°	-5°	-57°	-1°	-33°	10°	-36°	-11°	-34°	-29°
	75%	-19°	-6°	-48°	11°	-32°	25°	-31°	1°	-27°	-24°
	100%	-33°	27°	-39°	12°	-73°	65°	-27°	-11°	-12°	1°

ANNEXE A.4.3 SIMULATION

1. Représentants des différentes sous stratégies sur le petit véhicule

Ce paragraphe présente les sujets représentants de chaque sous stratégie sur le petit véhicule.

Sujets de la stratégie MM sur le petit véhicule															
	S01	S05	S06	S09	S11	S13	S17	S19	S20	S24	S25	S27	S33	S36	S41
Distance	1,68	2,13	2,02	1,81	2,40	3,29	2,05	2,20	1,22	1,93	1,93	1,85	1,62	2,77	1,14

Tableau A.4.3.1. Distances entre les sujets de la stratégie MM et le sujet fictif de la stratégie MM sur le petit véhicule.

D'après le tableau 4.4.3.1 le sujet représentant de la stratégie MM sur le petit véhicule est le sujet 41 de la base de mouvement (Cf. Annexe A.3.4).

Sujets de la stratégie BM sur le petit véhicule							
	S02	S03	S04	S18	S28	S35	S40
Distance	2.13	1.66	1.47	2.18	1.62	1.66	1.88

Tableau A.4.3.2. Distances entre les sujets de la stratégie BM et le sujet fictif de la stratégie BM sur le petit véhicule

D'après le tableau A.4.3.2 le sujet représentant de la stratégie BM sur le petit véhicule est le sujet 04 de la base de mouvement (Cf. Annexe A.3.4).

Sujets de la stratégie TB sur le petit véhicule			
	S16	S22	S30
Distance	1.44	2.10	1.70

Tableau A.4.3.3. Distances entre les sujets de la stratégie TB et le sujet fictif de la stratégie TB sur le petit véhicule

D'après le tableau A.4.3.3 le sujet représentant de la stratégie TB sur le petit véhicule est le sujet 16 de la base de mouvement (Cf. Annexe A.3.4).

Sujets de la stratégie TF sur le petit véhicule			
	S07	S23	S37
Distance	2.73	2.14	2.13

Tableau A.4.3.4. Distances entre les sujets de la stratégie TF et le sujet fictif de la stratégie TF sur le petit véhicule

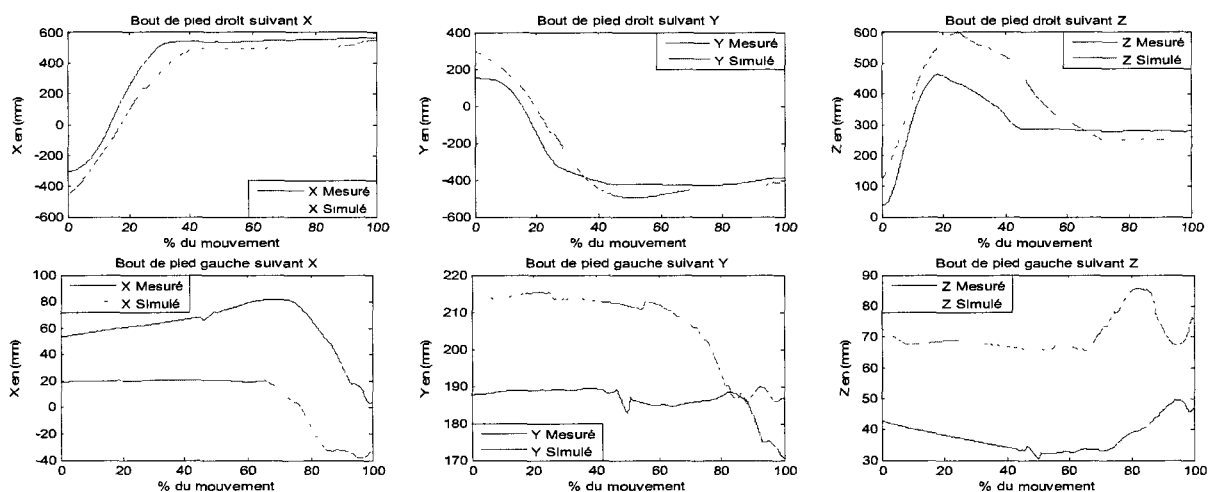
D'après le tableau A.4.3.4 le sujet représentant de la stratégie TF sur le petit véhicule est le sujet 37 de la base de mouvement (Cf. Annexe A.3.4).

2. Simulation VéhExpérimental(g) → VéhSimulation(p) à « 1 pied »

L'objectif est de simuler le mouvement d'entrée – à 1 pied – dans le Véhicule Simulation (ici le « petit véhicule ») à partir des informations extraites d'un mouvement réalisé sur le Véhicule Expérimental (ici « le grand véhicule »). L'exemple traité concerne un sujet âgé de 75 ans, mesurant 1.95m, pesant 90kg, muni d'une prothèse de hanche droite et ayant adopté la sous stratégie LS (« Lateral Sliding »), sur le « petit véhicule » et sur « le grand véhicule ».

2.1 Simulation des trajectoires des points caractéristiques sur le Véhicule Simulation

Les trajectoires des points « caractéristiques » obtenues sur le Véhicule Simulation sont le résultat de l'adaptation opérée sur les trajectoires des points caractéristiques extraites du mouvement réalisé sur le Véhicule Expérimental (Cf. §2.6.1.3). La figure A.4.3.1 présente les trajectoires des points « caractéristiques » mesurées et simulées sur le Véhicule Simulation (le « petit véhicule ») exprimées dans le repère lié au laboratoire.



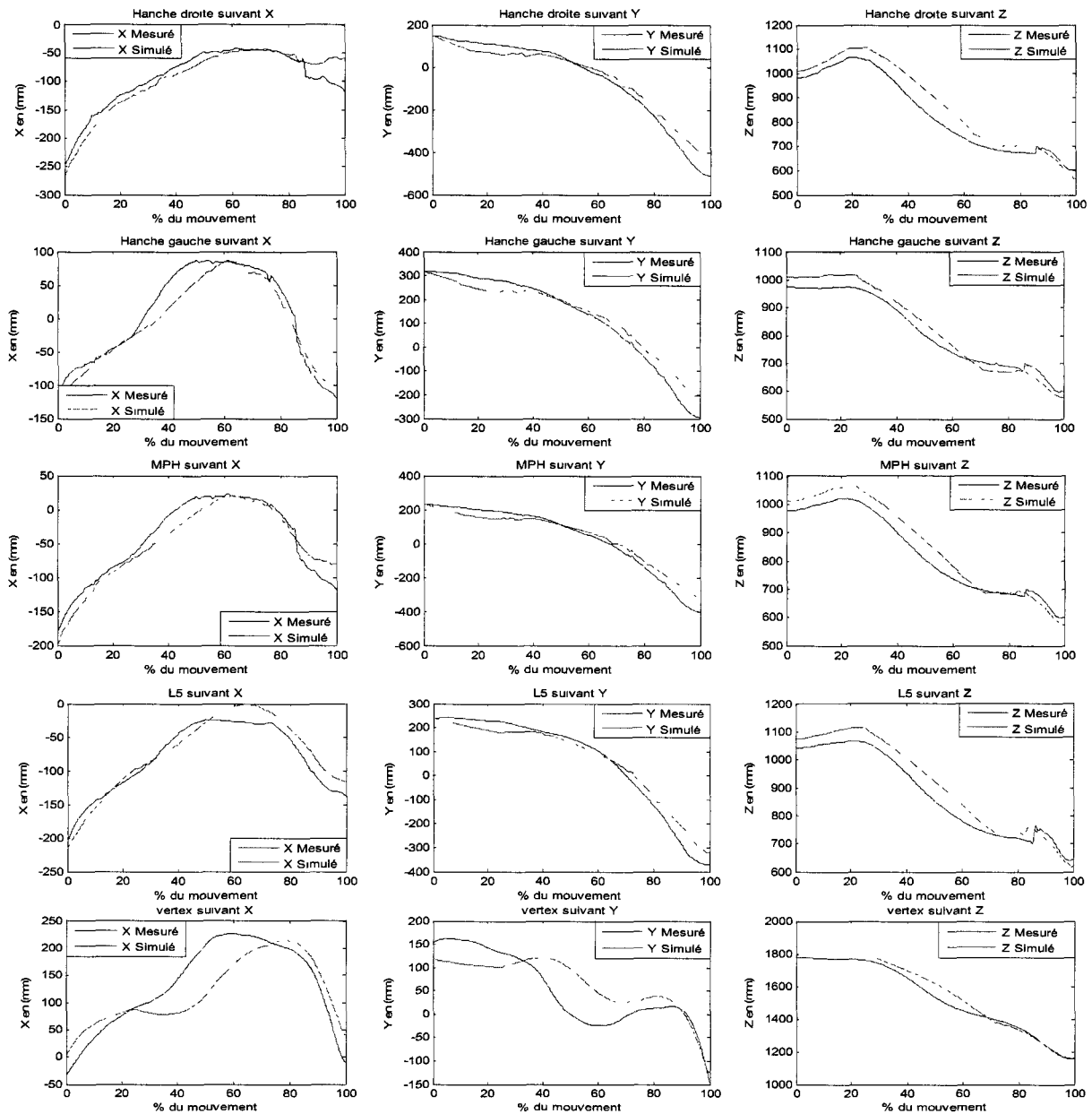


Figure A.4.3.1. Trajectoires des points caractéristiques mesurées et simulées sur le « petit véhicule » pour le sujet 12 réalisant la sous stratégie LS exprimées dans le repère lié au laboratoire.

Le tableau A.4.3.5 donne les coefficients de corrélation et les RMS Normalisées calculés entre les trajectoires des points caractéristiques mesurées et simulées sur le « grand véhicule ».

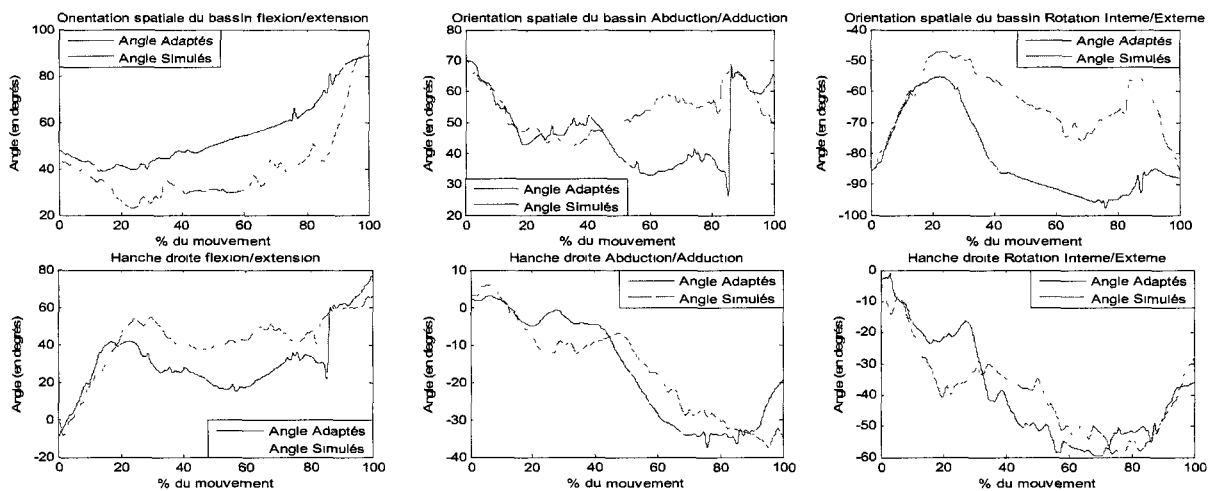
	X		Y		Z	
	r	RMSN	r	RMSN	r	RMSN
Bout pied droit	0.994	0.089	0.992	0.113	0.914	0.302
Bout pied gauche	0.861	0.459	0.823	0.647	0.651	0.435
MPH	0.982	0.073	0.998	0.075	0.996	0.088
Hanche droite	0.975	0.078	0.999	0.072	0.993	0.104
Hanche gauche	0.988	0.086	0.998	0.079	0.997	0.081
L5	0.983	0.085	0.999	0.064	0.995	0.097
Vertex	0.916	0.199	0.896	0.171	0.996	0.065

Tableau A.4.3.5. Coefficients de corrélation et RMS Normalisées calculées entre les trajectoires mesurées et simulées des points caractéristiques sur le « petit véhicule » pour le sujet 12 réalisant la sous stratégie LS.

Le tableau A.4.3.5 fait apparaître de bonnes corrélations pour le bout du pied droit, MPH, la hanche droite, la hanche gauche, MPH, L5 et vertex. Au contraire, pour les trajectoires du bout du pied gauche les résultats sont relativement moins bons. Les hypothèses, mais aussi la variabilité au sein d'une même stratégie, donc aussi intra individuelle, peut expliquer en partie de tels résultats. Nous avons expliqué cette divergence par les différences intra- individuelles (Cf. Chapitre 5).

2.2 Simulation des angles articulaires et de l'orientation du bassin sur le Véhicule Simulation

Les angles articulaires et l'orientation spatiale du bassin sont calculés tels que les points « caractéristiques » attachés à l'humanoïde suivent « au plus près » les trajectoires des points caractéristiques précédemment simulés. La figure A.4.3.2 présente les angles articulaires et l'orientation spatiale du bassin adaptés et simulés sur le « grand véhicule ».



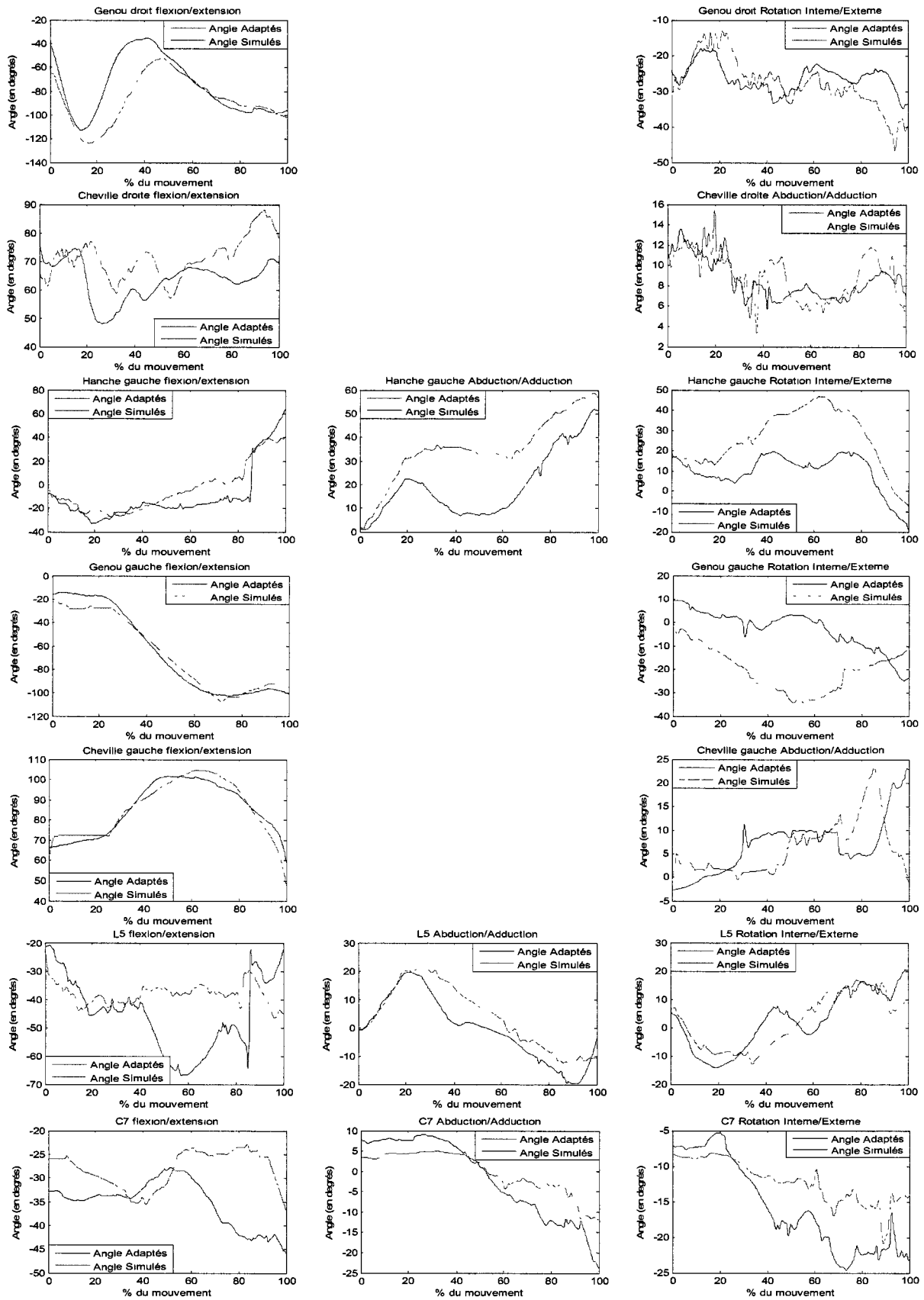


Figure A.4.3.2 Orientation spatiale du bassin et angles articulaires adaptés et simulés sur le Véhicule Simulation (le « petit véhicule ») pour le sujet 12 réalisant la sous stratégie LS.

Le tableau A.4.3.6 présente les coefficients de corrélation et les RMS Normalisées calculés entre les angles articulaires et l'orientation spatiale du bassin adaptés et simulés sur le « grand véhicule ».

	Flexion/Extension		Abduction/adduction		Rotation Interne/Externe	
	r	RMSN	r	RMSN	r	RMSN
Bassin	0.936	0.26			0.815	0.686
Cheville droit			0.82	0.183	-	-
Genou droit	0.864	0.227	-	-	0.759	0.216
Hanche droite	0.866	0.188	0.945	0.161	0.923	0.155
Cheville gauche	0.977	0.072			-	-
Genou gauche	0.996	0.068	-	-		
Hanche gauche	0.949	0.129	0.916	0.347	0.903	0.673
L5			0.969	0.158	0.901	0.132
C7			0.981	0.242	0.95	0.337

Tableau A.4.3.6 Coefficients de corrélation et RMS Normalisées calculés entre les angles articulaires et l'orientation spatiale du bassin adaptés et simulés sur le « petit véhicule » pour le sujet 12 réalisant la sous stratégie LS.

Les résultats obtenus peuvent être classés en 3 catégories, les résultats relativement bons (représentés en vert, pour $r \geq 0.80$ et $NRMS \leq 0.30$), relativement moyens (représentés en jaune, pour $r \geq 0.80$ ou $NRMS \leq 0.30$) et plutôt « mauvais » (représentés en rouge, pour $r < 0.80$ et $NRMS > 0.30$).

- Les résultats relativement bons regroupent : la flexion/extension du bassin, l'abduction/adduction de la cheville droite, la flexion/extension du genou droit, la flexion/extension, l'abduction/adduction et la rotation interne/externe de la hanche droite, l'abduction/adduction de la cheville droite, la flexion/extension de la cheville gauche, la flexion/extension du genou gauche, la flexion/extension de la hanche gauche, l'abduction/adduction et la rotation interne/externe en L5 et l'abduction/adduction en C7.

- Les résultats relativement moyens regroupent : la rotation interne/externe du bassin, la rotation interne/externe du genou droit, l'abduction/adduction et la rotation interne/externe de la hanche gauche et la rotation interne/externe en C7.

- Les résultats plutôt « mauvais » regroupent : l'abduction/adduction du bassin, la flexion/extension de la cheville droite, l'abduction/adduction de la cheville gauche, la rotation interne/externe du genou gauche, la flexion/extension en L5 et la flexion/extension en C7.

Ces résultats montrent globalement que 1) le bassin est plutôt moyennement orienté dans l'espace, 2) la flexion/extension de L5 n'est pas satisfaisante et que les résultats se dégradent plus on se rapproche des pieds.

La figure A.4.3.3 présente en quelques images (une chaque 10%) le mouvement simulé et le mouvement mesuré sur le « grand véhicule » pour la sous stratégie LS. Malgré les

différences relevées entre les angles articulaires et l'orientation spatiale du bassin adaptés et simulés, ces représentations font apparaître des ressemblances entre les mouvements mesurés et simulés.

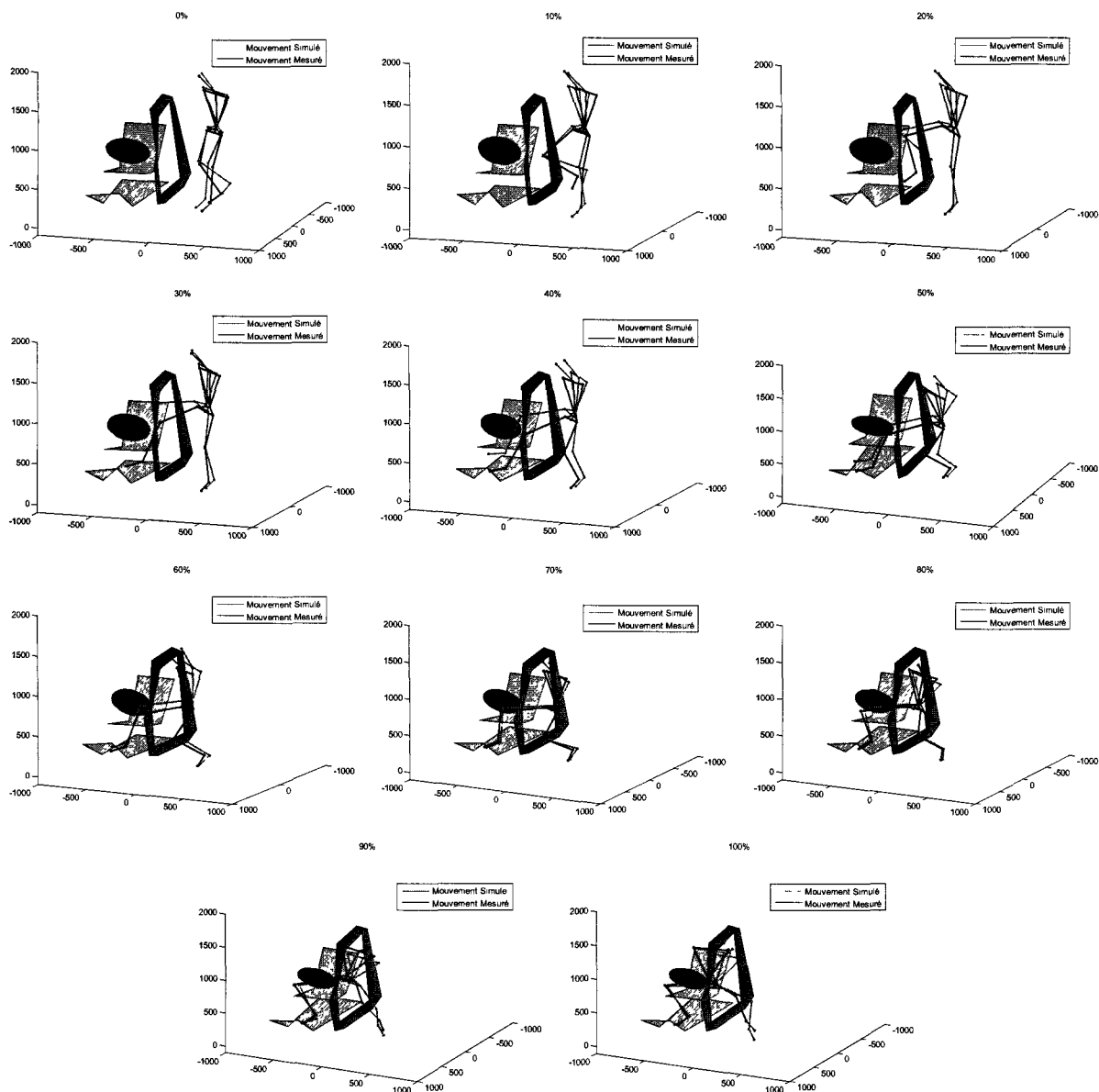


Figure A.4.3.3. Postures simulées et postures mesurées sur le « petit véhicule » pour le sujet 12 réalisant la sous stratégie LS.

2.3 Etude de la sous stratégie du mouvement simulé

Cette partie vise à vérifier l'appartenance du mouvement simulé à la sous stratégie retenue pour la simulation sur le Véhicule Simulation.

2.3.1 Détermination des représentants pour chaque stratégie d'entrée

Les caractéristiques des sujets fictifs pour chaque stratégie sont identiques à celles présentées dans le tableau 4.9 (Cf. Chapitre IV). Ainsi les sujets « réels » représentant de

chaque stratégie sur le véhicule de simulation sont identiques à ceux identifiés dans le paragraphe précédent (Cf. Tableaux A.4.3.1, A.4.3.2, A.4.3.3 et A.4.3.4)).

2.3.2 Evaluation du mouvement simulé

Les caractéristiques des sujets réels représentant des différentes stratégies d'entrée identifiées sur le véhicule cible sont identiques à celle présentées dans le tableau 4.11 du chapitre IV.

Le tableau A.4.3.7 présente les distances calculées entre les caractéristiques angulaires du mouvement simulé sur le Véhicule Simulation et celles des mouvements des sujets réels représentant les sous stratégies d'entrée.

	Représentants des différentes stratégies sur le petit véhicule				
	LS (S12)	MM (S41)	TB (S16)	TF (S37)	BM (S04)
Distance	3.30	4.00	4.29	4.99	3.92

Tableau A.4.3.7 Distances entre les angles articulaires du mouvement simulé et ceux des sujets représentant des différentes stratégies identifiées sur le petit véhicule.

Le tableau A.4.3.7 montre que cette distance est minimale (3.30) pour la sous stratégie LS. Le mouvement simulé relève donc bien de la stratégie LS, stratégie adoptée par le sujet sur le Véhicule Expérimental et simulé ici sur le Véhicule Simulation.

3. Simulation VéhExpérimental(g) → VéhiCible(p) à « 2 pieds »

L'objectif est de simuler le mouvement d'entrée dans le Véhicule Simulation (ici le « petit véhicule ») à partir des informations extraites d'un mouvement réalisé sur le Véhicule Expérimental (ici « le grand véhicule »). L'exemple traité concerne un sujet âgé de 52 ans, mesurant 1.72 m, pesant 64.4 kg, muni d'une prothèse de hanche droite et ayant adopté la sous stratégie TB (« Trunk Backward ») sur le « grand véhicule ».

3.1 Simulation des trajectoires des points caractéristiques sur le Véhicule Simulation

Les trajectoires des points « caractéristiques » obtenues sur le Véhicule Simulation sont le résultat de l'adaptation opérée sur les trajectoires des points extraits du mouvement réalisé sur le Véhicule Expérimental (Cf. §2.6.1.3). La figure A.4.3.4 présente les trajectoires des points « caractéristiques » mesurées et simulées sur le Véhicule Simulation (le « petit véhicule ») exprimées dans le repère lié au laboratoire.

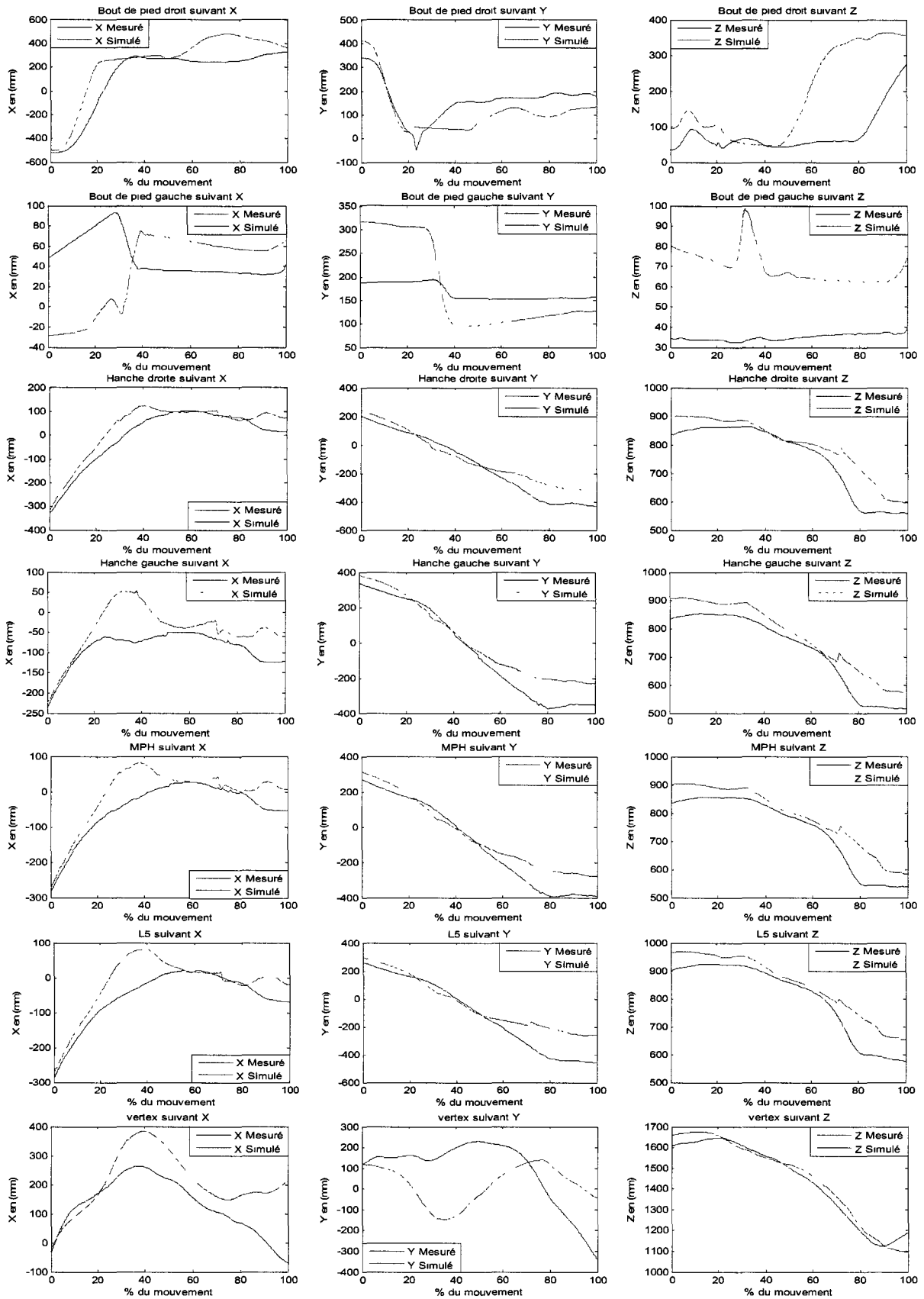


Figure A.4.3.4. Trajectoires mesurées et simulées sur le « petit véhicule » des points caractéristiques pour le sujet 16 réalisant la sous stratégie TB exprimées dans le repère lié au laboratoire.

Le tableau A.4.3.8 donne les coefficients de corrélation et les RMS Normalisées calculés entre les trajectoires des points caractéristiques mesurées et simulées sur le Véhicule Simulation (ici « le petit véhicule »).

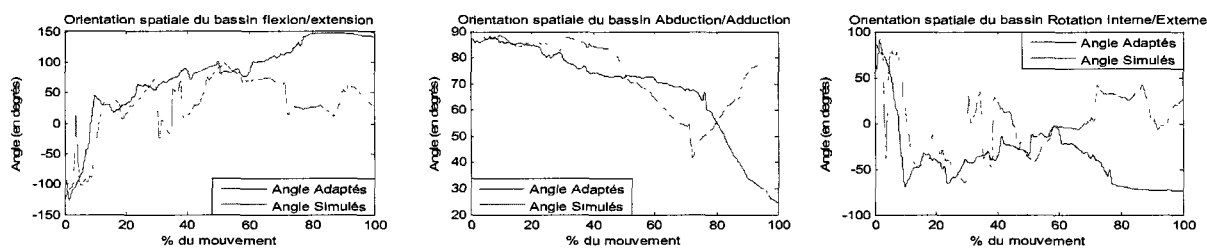
	X		Y		Z	
	r	RMSN	r	RMSN	r	RMSN
Bout pied droit	0.968	0.187	0.92	0.214	0.799	0.653
Bout pied gauche	0.095	0.453	0.98	0.764	0.21	0.613
MPH	0.958	0.172	0.99	0.143	0.99	0.211
Hanche droite	0.982	0.107	0.987	0.136	0.975	0.222
Hanche gauche	0.893	0.337	0.993	0.152	0.99	0.205
L5	0.942	0.184	0.981	0.219	0.988	0.221
Vertex	0.867	0.368	0.433	0.526	0.994	0.06

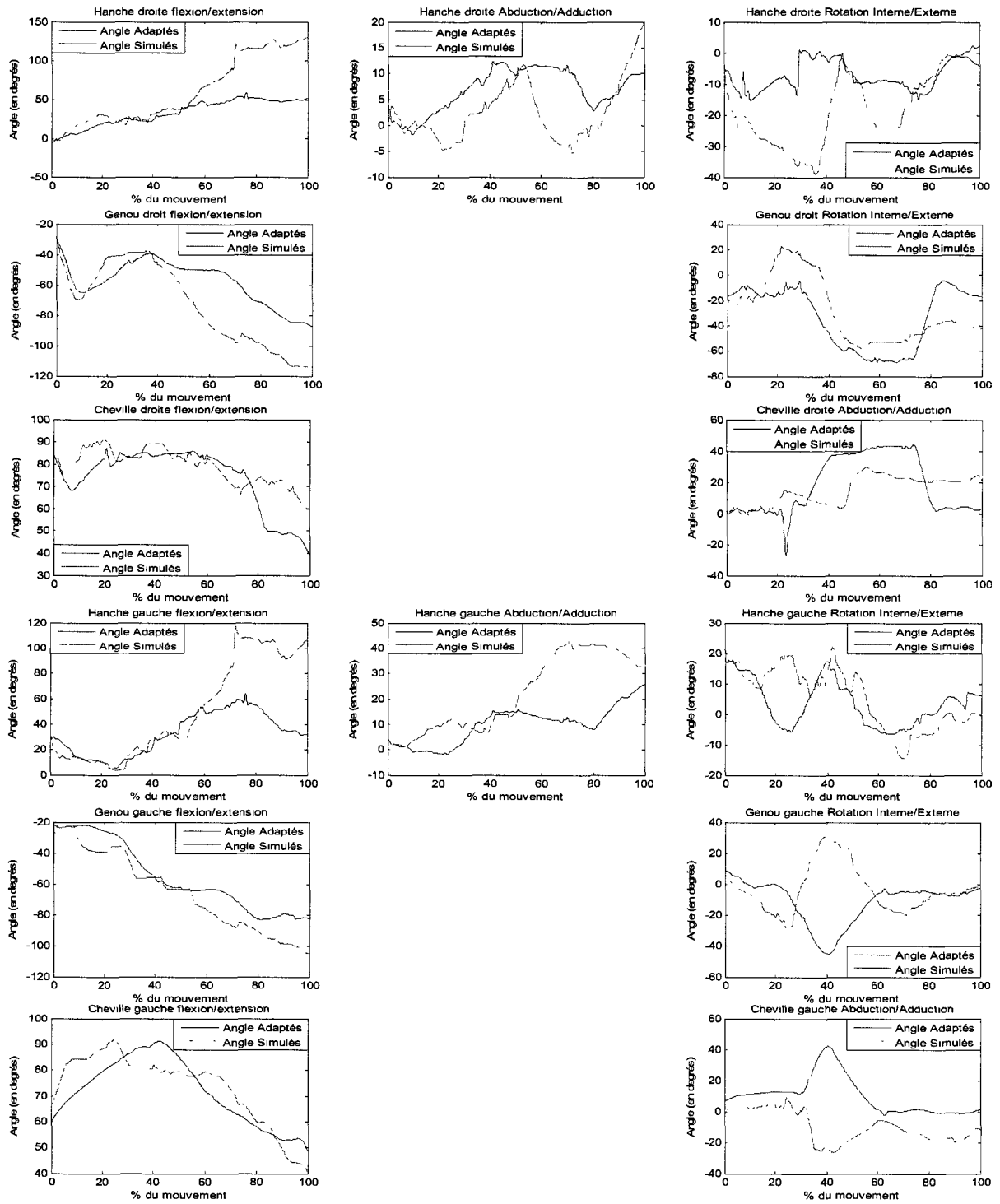
Tableau A.4.3.8. Coefficients de corrélation et RMS Normalisées calculés entre les trajectoires des points caractéristiques mesurées et simulées pour le sujet 16 réalisant la sous stratégie TB.

Le tableau A.4.3.8 fait apparaître dans l'ensemble de bonnes corrélations pour le bout du pied droit, MPH, L5, la hanche droite, la hanche gauche et le vertex. Au contraire, les résultats sont moins bons pour les trajectoires du bout du pied gauche. Les hypothèses, mais aussi la variabilité au sein d'une même stratégie peut expliquer en partie un tel résultat. Des explications des différences observées sont présentées en Chapitre 5.

3.2 Simulation des angles articulaires et de l'orientation du bassin sur le Véhicule Simulation

Les angles articulaires et l'orientation spatiale du bassin sont calculés tels que les points « caractéristiques » attachés à l'humanoïde suivent « au mieux » les trajectoires des points « caractéristiques » précédemment simulés. La figure A.4.3.5 présente les angles articulaires et l'orientation spatiale adaptés et simulés sur le Véhicule Simulation (« le grand véhicule »).





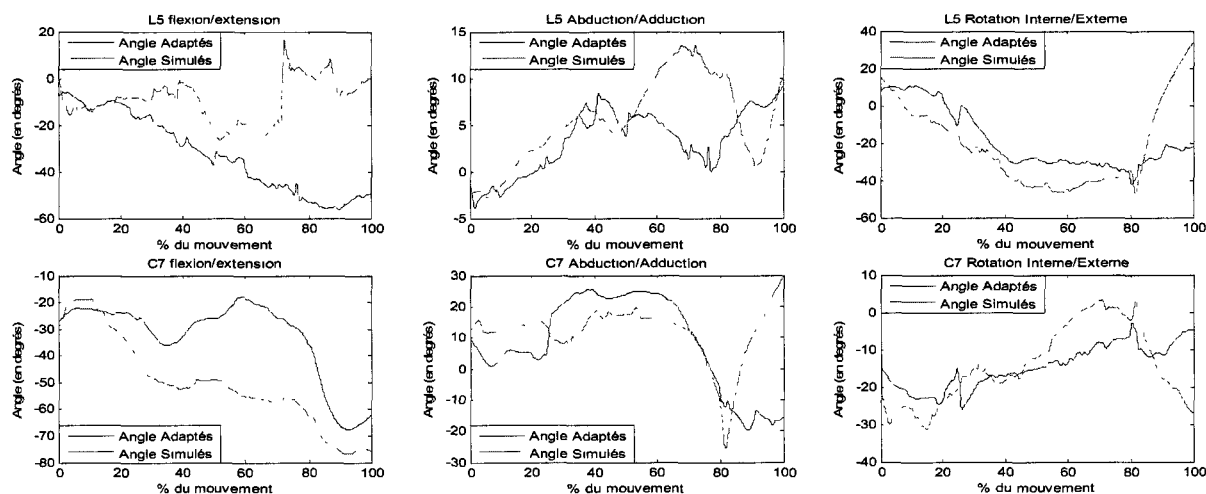


Figure A.4.3.5. Orientation spatiale du bassin et angles articulaires adaptés et simulés sur le Véhicule Simulation (le « petit véhicule ») pour le sujet 16 réalisant la sous stratégie TB.

Le tableau A.4.3.9 présente les coefficients de corrélation et les RMS normalisées calculés entre les angles articulaires et l'orientation spatiale du bassin adaptés et simulés sur le Véhicule Simulation (le « petit véhicule »).

	Flexion/Extension		Abduction/adduction		Rotation Interne/Externe	
	r	RMSN	R	RMSN	r	RMSN
Bassin	0.826	0.25				
Cheville droit	0.879	0.39			-	-
Genou droit	0.908	0.269	-	-	0.819	0.398
Hanche droite	0.95	0.64				
Cheville gauche	0.91	0.16			-	-
Genou gauche	0.983	0.144	-	-		
Hanche gauche	0.892	0.534	0.817	0.698	0.757	0.273
L5						
C7	0.863	0.354	0.673	0.29	0.811	0.279

Tableau A.4.3.9. Coefficients de corrélation et RMS Normalisées calculés entre les angles articulaires et l'orientation spatiale adaptés et simulés sur le Véhicule Simulation (le « petit véhicule ») pour le sujet 16 réalisant la sous stratégie TB.

Comme pour la stratégie à 1 pied, les résultats obtenus peuvent être classés en 3 catégories, les résultats relativement bons (représentés en vert, pour $r \geq 0.80$ et $NRMS \leq 0.30$), relativement moyens (représentés en jaune, pour $r \geq 0.80$ ou $NRMS \leq 0.30$) et plutôt « mauvais » (représentés en rouge, pour $r < 0.80$ et $NRMS > 0.30$).

- Les résultats relativement bons regroupent : la flexion/extension du bassin, la flexion/extension du genou droit, la flexion/extension de la cheville gauche, la flexion/extension du genou gauche et la rotation interne/externe de C7.

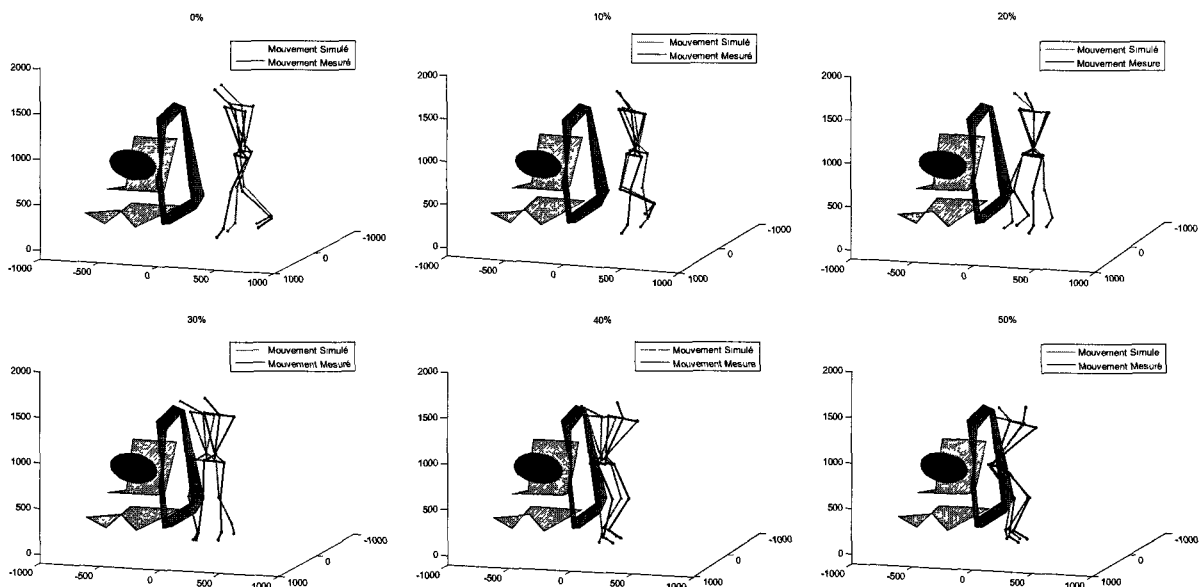
- Les résultats relativement moyens regroupent : la flexion/extension de la cheville droite, la rotation interne/externe du genou droit, la flexion/extension de la hanche droite, la flexion/extension, l'abduction/adduction et la rotation interne/externe de la hanche gauche, la flexion/extension et la rotation interne/externe de C7.

- Les résultats plutôt « mauvais » regroupent : l'abduction/adduction et la rotation interne/externe du bassin, l'abduction/adduction de la cheville droite, l'abduction/adduction et la rotation interne/externe de la hanche droite, l'abduction/adduction de la cheville gauche, la rotation interne/externe du genou gauche, la flexion/extension, l'abduction/adduction et la rotation interne/externe de L5.

Ces résultats montrent globalement que 1) le bassin est plutôt mal orienté dans l'espace, 2) la flexion/extension de L5 n'est pas satisfaisante et que les résultats se dégradent plus on se rapproche des pieds.

Ces résultats étaient prévisibles, comme pour la stratégie à 1 pied, compte tenu des trajectoires des points caractéristiques simulés présentés précédemment.

La figure A.4.3.6 présente en quelques images (une chaque 10%) le mouvement simulé et le mouvement mesuré sur le « petit véhicule » pour la sous stratégie TB. Malgré les différences relevées entre les angles articulaires et l'orientation spatiale du bassin adaptés et simulés, ces représentations font apparaître des ressemblances entre les mouvements adaptés et simulés.



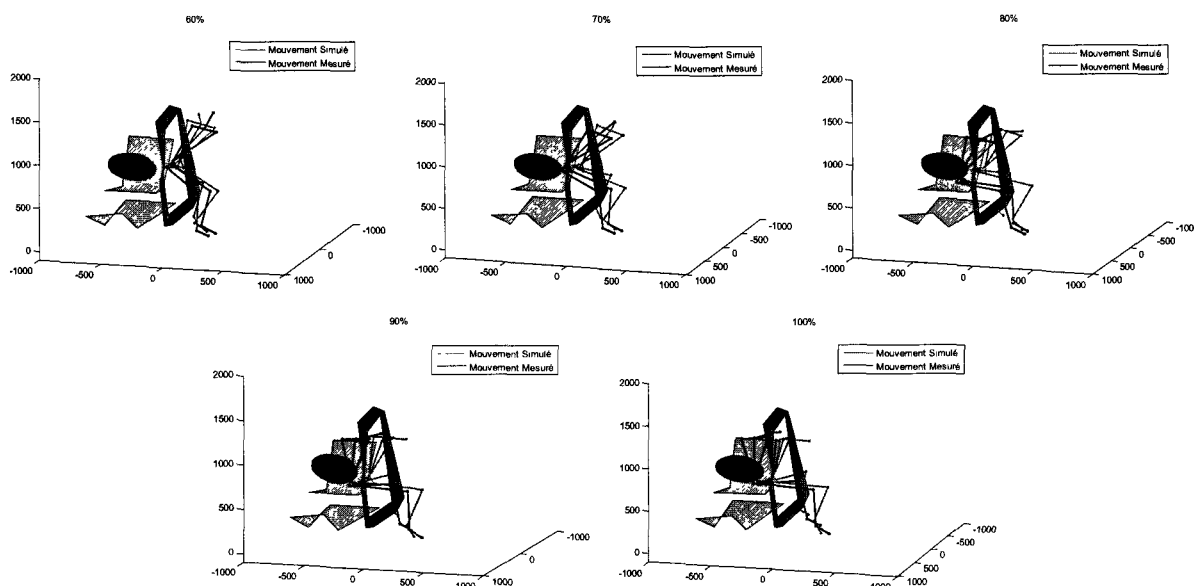


Figure A.4.3.6. Postures simulées et postures mesurées sur le « petit véhicule » pour le sujet 16 réalisant la sous stratégie TB.

3.3 Etude de la sous stratégie du mouvement simulé

Cette partie vise à vérifier l'appartenance du mouvement simulé à la sous stratégie retenue pour la simulation sur le Véhicule Simulation.

3.3.1 Détermination des représentants pour chaque stratégie d'entrée

Les caractéristiques des sujets fictifs pour chaque stratégie sont identiques à celles présentées dans le tableau 4.9 (Cf. Chapitre IV). Ainsi les sujets « réels » représentant de chaque stratégie sur le véhicule de simulation sont identiques à ceux identifiés dans le paragraphe précédent (Cf. Tableaux A.4.3.1, A.4.3.2, A.4.3.3 et A.4.3.4).

3.3.2 Evaluation du mouvement simulé

Les caractéristiques des sujets réels représentants des différentes stratégies d'entrée identifiées sur le véhicule cible sont identiques à celle présentées dans le tableau 4.11 du chapitre IV.

Le tableau A.4.3.10 présente les distances calculées entre les caractéristiques angulaires du mouvement simulé sur le Véhicule Simulation et celles des mouvements des sujets réels représentant les sous stratégies d'entrée.

Représentants des différentes stratégies sur le petit véhicule					
	LS (S12)	MM (S41)	TB (S16)	TF (S37)	BM (S04)
Distance	5.30	4.53	3.59	4.19	5.92

Tableau A.4.3.10 Distances entre les angles articulaires du mouvement simulé et ceux des sujets représentants des différentes stratégies identifiées sur le petit véhicule.

Le tableau A.4.3.10 montre que cette distance est minimale (3.59) pour la sous stratégie TB. Le mouvement simulé relève donc bien de la stratégie TB, stratégie adoptée par le sujet sur le Véhicule Expérimental et simulé ici sur le Véhicule Simulation.

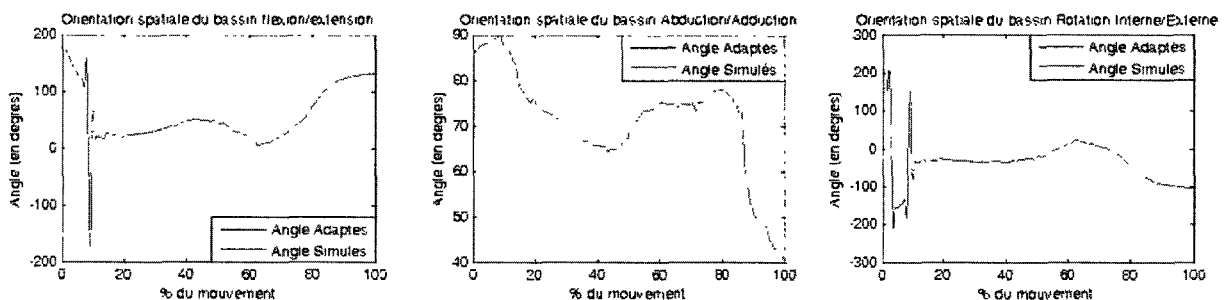
4. Simulation $VéhExpérimental(p) \rightarrow VéhSimulation(g)$

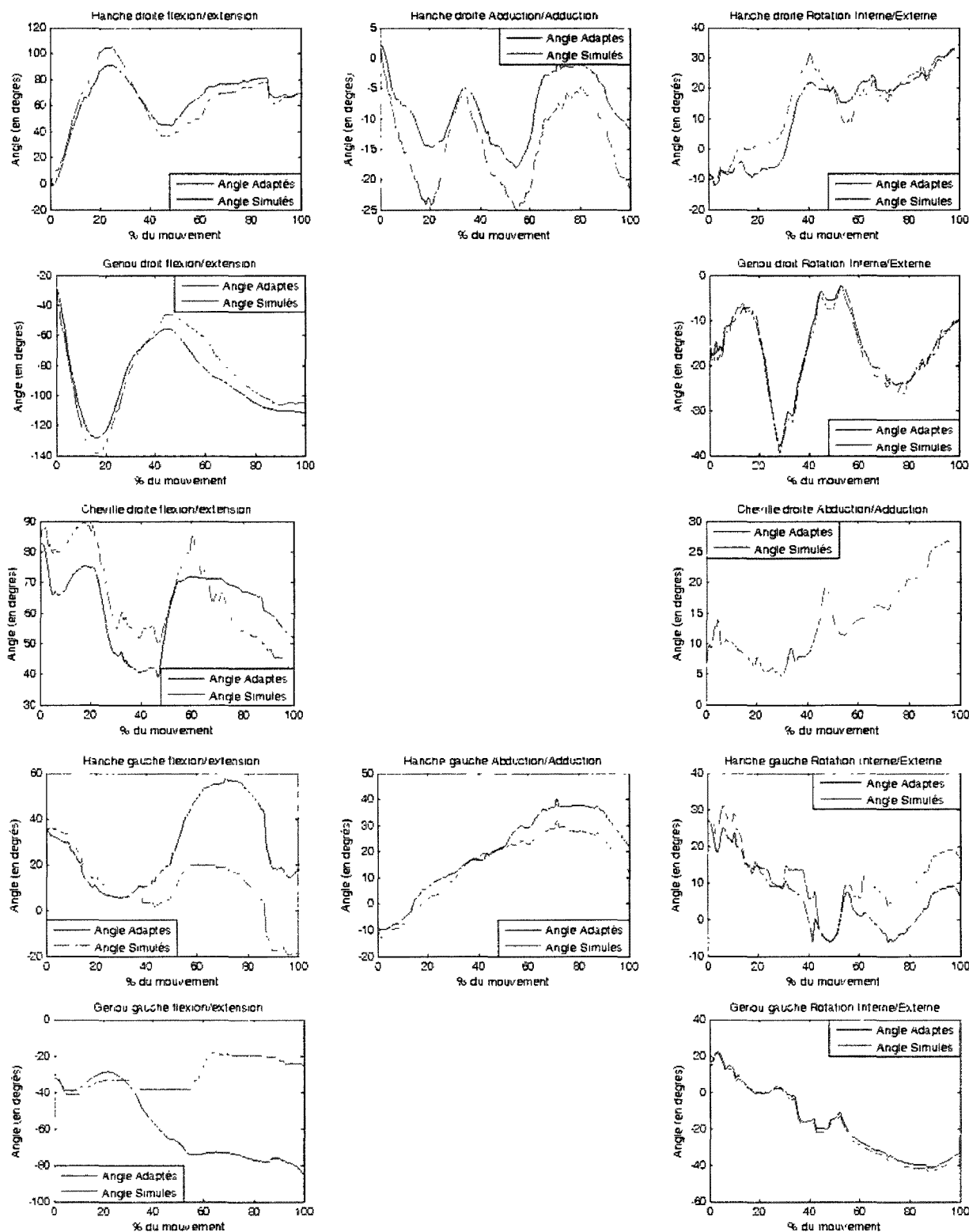
L'objectif est de simuler sur le Véhicule Simulation (le « grand véhicule ») la stratégie d'entrée adoptée par un sujet sur le Véhicule Expérimental (le « petit véhicule »), mais qui n'avait pas été retenue par ce sujet sur le Véhicule Simulation lors des expérimentations. Dans le chapitre 4 nous avons montré le cas d'un sujet âgé de 70 ans, mesurant 1.72 m, pesant 85 kg, muni d'une prothèse de genou gauche, et ayant adopté la sous stratégie MM sur le « petit véhicule » et la sous stratégie FM sur le « grand véhicule ». Dans le présent paragraphe nous présentons un cas d'un sujet féminin âgé de 27 ans, mesurant 1.55 m, pesant 53.5 kg, sans problème particulier, et ayant adopté la sous stratégie BM sur le « petit véhicule » et la sous stratégie FM sur le « grand véhicule ».

4.1 Simulation des angles articulaires et orientation spatiale du bassin sur le Véhicule Simulation

Dans un premier temps, les trajectoires des points « caractéristiques » sont simulées sur le Véhicule Simulation à l'aide des informations extraites du mouvement réalisé par le sujet sur Véhicule Expérimental. Puis, les angles articulaires et l'orientation spatiale du bassin sont calculés tels que les trajectoires des points « caractéristiques » attachés à l'humanoïde suivent « au mieux » les trajectoires des points « caractéristiques » simulées.

La figure A.4.3.7 présente les angles articulaires et l'orientation spatiale du bassin adaptés sur le Véhicule Expérimental (le « petit véhicule ») et simulés sur le Véhicule Simulation (le « grand véhicule »).





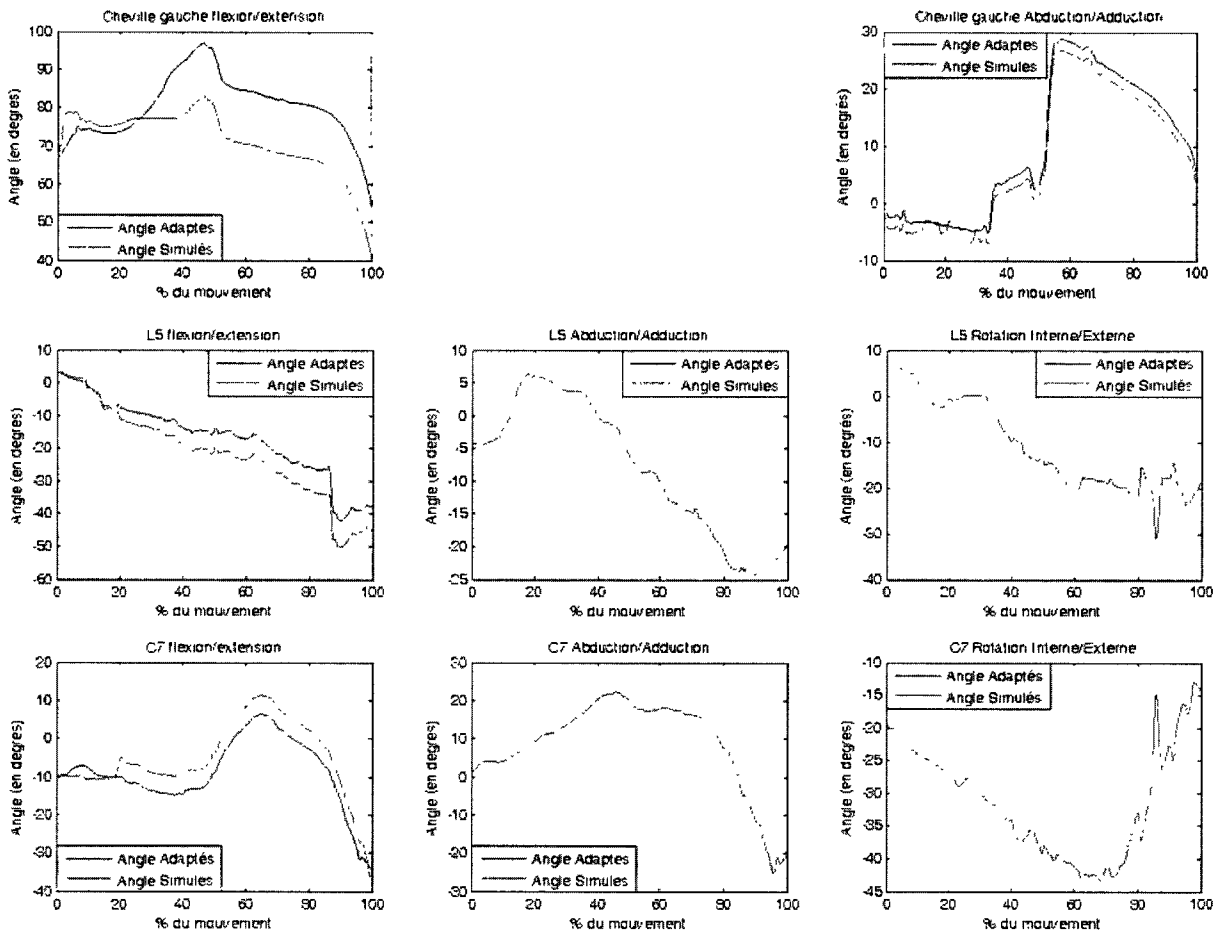


Figure A.4.3.7. Orientation spatiale du bassin et angles articulaires et orientation spatiale adaptés sur Véhicule Expérimental (le « petit véhicule ») et simulés sur le Véhicule Simulation (le « grand véhicule ») pour le sujet 3 réalisant la sous stratégie BM.

Cette figure montre de bonnes ressemblances pour certains angles (ex. les angles d'orientation spatiale du bassin, les angles en C7, en L5). Au contraire, d'autres angles diffèrent de manière importante. C'est le cas des angles de flexion/ extension du genou gauche, des chevilles ou encore de la hanche gauche. Cette figure fait apparaître également certaines anomalies au niveau des angles de flexion/extension du genou gauche.

Le tableau A.4.3.11 présente les coefficients de corrélation entre les angles articulaires et l'orientation spatiale du bassin adaptés sur le Véhicule Expérimental (le « petit véhicule ») et simulés sur le Véhicule Simulation (le « grand véhicule »).

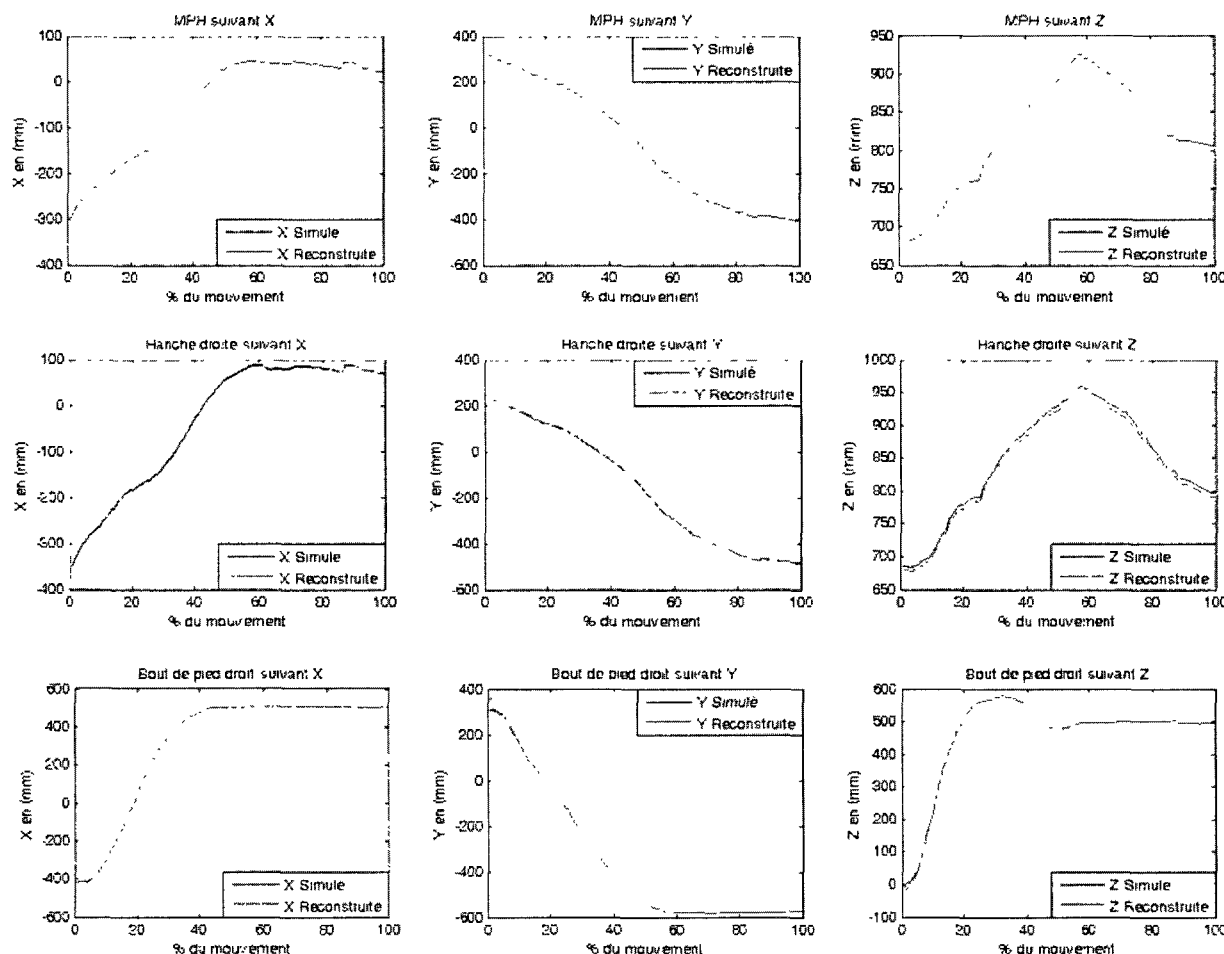
	Flexion/Extension	Abduction/adduction	Rotation Interne/Externe
	R	r	r
Bassin	1	1	1
Cheville droit	0.84	1	-
Genou droit	0.974	-	0.996
Hanche droite	0.964	0.968	0.973
Cheville gauche	0.798	0.999	-

Genou gauche	0.171	-	0.999
Hanche gauche	0.699	0.989	0.938
L5	0.998	1	1
C7	0.983	1	1

Tableau A.4.3.11. Coefficients de corrélation calculés entre les angles articulaires et l'orientation spatiale du bassin adaptés sur le Véhicule Expérimental et simulés sur le Véhicule Simulation pour le sujet 3 réalisant la sous stratégie BM.

Pour les angles de l'orientation spatiale du bassin et les angles articulaires de la cheville droite, du genou droit, de la hanche droite, de rotation interne/ externe du genou gauche, et abduction/ adduction de la hanche gauche, rotation interne/ externe de la hanche gauche, de L5 et de C7 le coefficient de corrélation est supérieur à 0.85. Au contraire, il n'est que de 0.69 pour la flexion/ extension de la hanche gauche et de 0.79 pour l'angle de la cheville gauche et de 0.17 pour l'angle de flexion/ extension pour le genou gauche.

La figure A.4.3.8 présente les trajectoires des points « caractéristiques » reconstruites (obtenus à l'aide du MGD en injectant les angles simulés) et simulées sur le Véhicule Simulation (le « grand véhicule ») exprimées dans le repère lié au laboratoire.



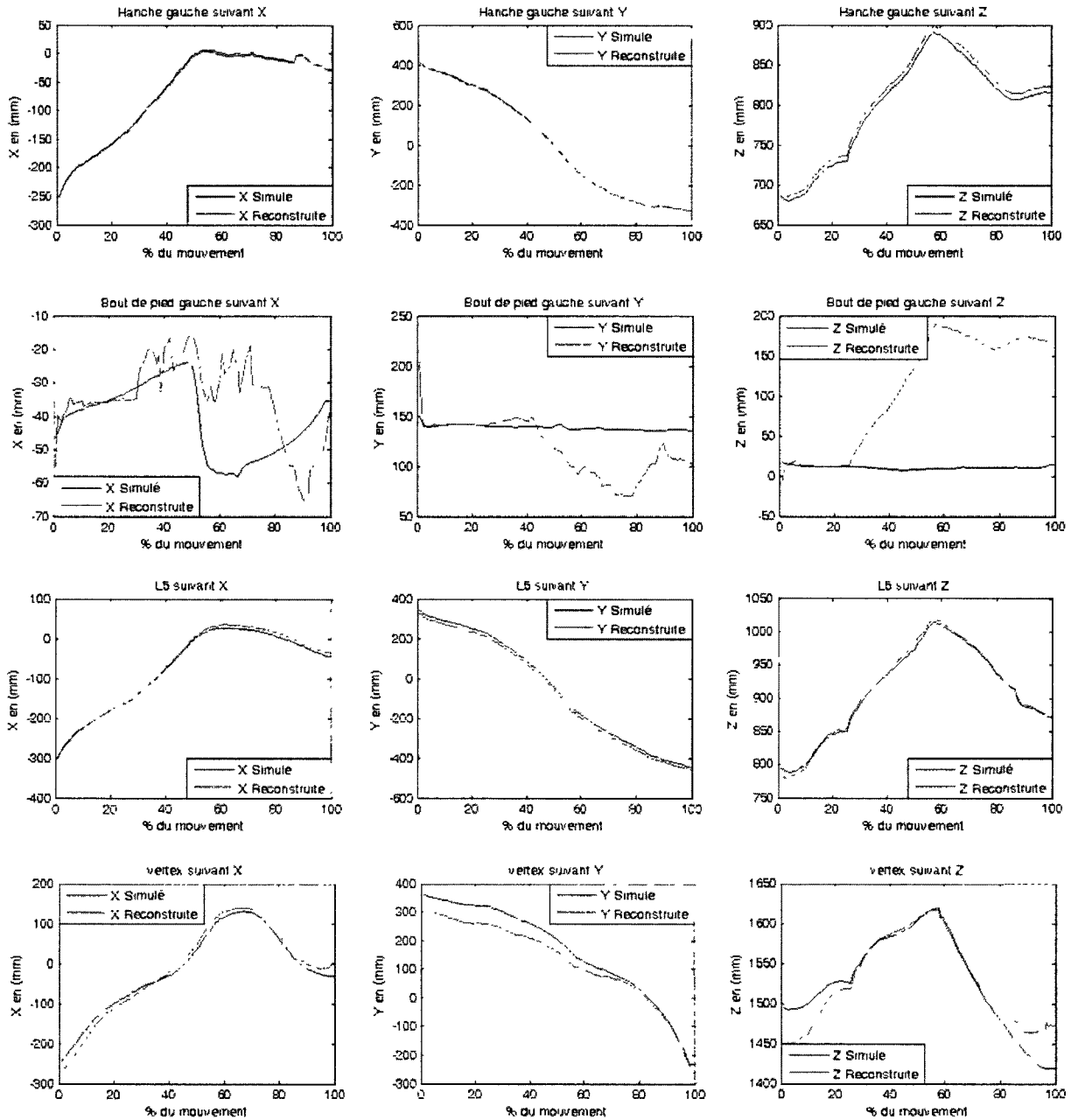


Figure A.4.3.8. Trajectoires des points caractéristiques reconstruites (à l'aide du MGD) et simulés dans le Véhicule Simulation (le « grand véhicule ») pour le sujet 3 réalisant la sous stratégie BM exprimées dans le repère lié au laboratoire.

Cette figure fait apparaître un « saut » non réaliste dans la trajectoire du pied gauche d'environ 20 cm. Le tableau A.4.3.13 présente les coefficients de corrélation et les RMS Normalisée entres les trajectoires reconstruites (à l'aide du MGD) et simulées des points « caractéristiques ».

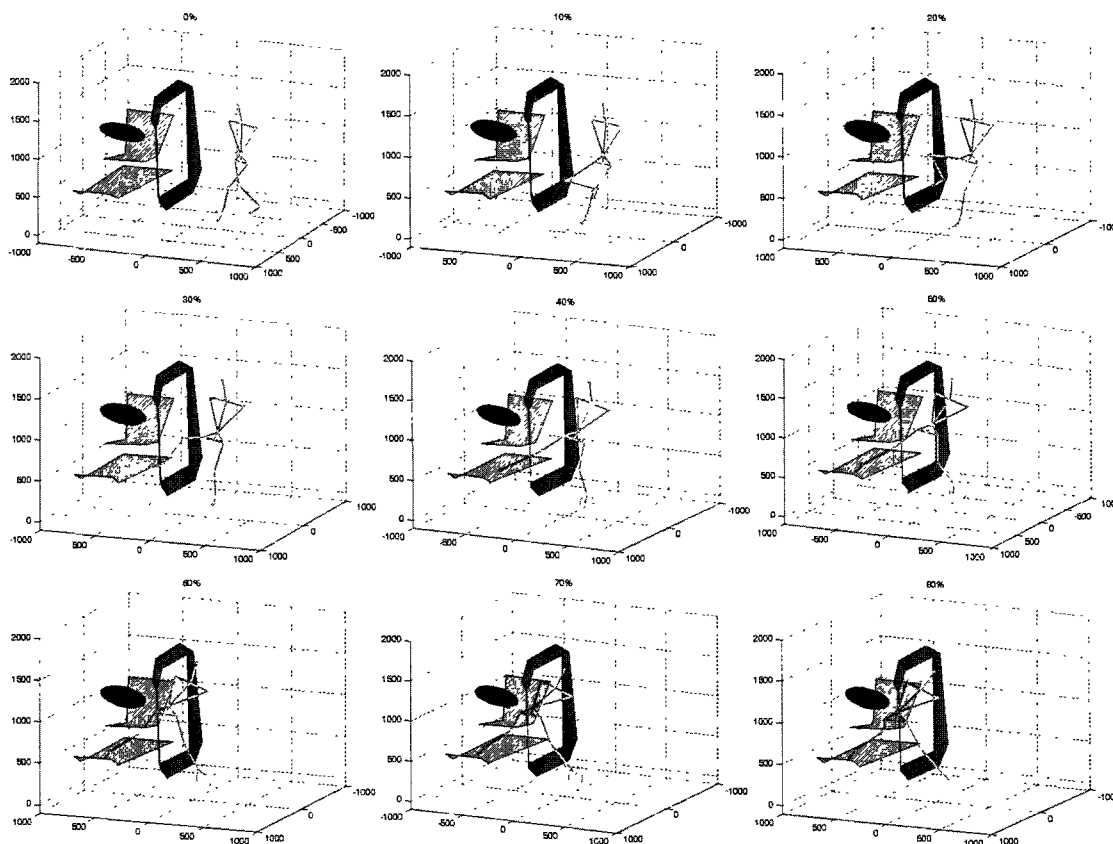
	X		Y		Z	
	r	RMSN	r	RMSN	r	RMSN
MPH	1	0	1	0	1	0

Hanche droite	1	0.005	1	0.002	1	0.026
Bout de pied droit	1	0.002	0.999	0.006	0.999	0.005
Hanche gauche	1	0.009	1	0.002	1	0.035
Bout de pied gauche						
L5	0.999	0.018	1	0.02	0.999	0.02
Vertex	0.999	0.036	0.999	0.068	0.964	0.13

Tableau A.4.3.13. Coefficients de corrélation et RMS Normalisées entre les trajectoires reconstruites (à l'aide du MGD) et simulées pour le sujet 3 réalisant la sous stratégie BM.

En dehors du bout de pied gauche, les coefficients de corrélation sont supérieurs à 0.96 et les RMSN sont inférieures à 13%. Au contraire, pour le bout de pied gauche, l'erreur peut atteindre les 85% (selon Z).

La figure A.4.3.9 présente en quelques images (une chaque 10%) le mouvement simulé. Il est mis en évidence à partir de 40% le « saut » (non réaliste) réalisé par l'humanoïde de synthèse pour respecter « au mieux » les différentes contraintes de la simulation.



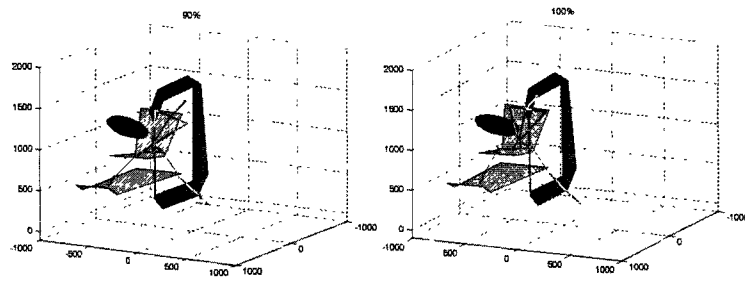


Figure A.4.3.9. *Postures simulées sur le Véhicule Simulation (le « grand véhicule ») pour le sujet 3 réalisant la sous stratégie BM.*

Modélisation, analyse et simulation du mouvement d'entrée dans des véhicules automobiles à géométries variables : Application au mouvement d'entrée des personnes âgées et/ou ayants des déficiences motrices

Résumé : La difficulté éprouvée pour monter ou descendre d'un véhicule automobile peut amener les personnes âgées et/ou ayants des déficiences motrices à ne plus utiliser leur véhicule. Les constructeurs automobiles l'ont compris et s'intéressent aujourd'hui à ces populations vieillissantes et/ou déficientes sujettes à des troubles de l'appareil locomoteur ainsi qu'à ce geste complexe nécessitant une coordination précise des mouvements articulaires du corps humain. Une alternative pour comprendre et prévoir ce mouvement est d'utiliser la simulation numérique.

Les travaux réalisés s'inscrivent dans ce contexte et portent sur la simulation cinématique du mouvement d'entrée d'un humanoïde de synthèse (constitué d'une tête, d'un tronc, d'un bassin et des membres inférieurs) dans des véhicules de dimensions variables à partir de données réelles issues de l'expérimentation. Pour résoudre ce problème « complexe », nous proposons une démarche méthodologique en trois étapes. Une première étape porte sur la constitution d'une base de mouvements dits « exploitables » issues de l'expérimentation menée sur deux véhicules de géométrie distinctes. Ces mouvements « exploitables » sont le résultat de traitements numériques appliqués aux mouvements d'entrée mesurés. Ces traitements permettent, entre autres, d'adapter les angles articulaires mesurés à l'humanoïde de synthèse retenu afin d'éviter d'éventuelles collisions avec l'habitacle qui n'auraient pas été constatées lors des expérimentations. Une deuxième étape porte sur l'analyse et l'identification de manière automatique des stratégies d'entrée dans un véhicule automobile. Cette étape procède en quatre phases à l'issue desquelles 2 stratégies ainsi que 6 sous stratégies du mouvement d'entrée sont identifiées. Une troisième étape, constituée de 4 phases également, utilise les acquis issus des étapes 1 et 2 pour simuler un mouvement d'entrée d'un sujet de la base adoptant une sous stratégie donnée dans un véhicule de géométrie différente. La simulation du mouvement d'entrée d'un même sujet dans un autre véhicule relève d'un problème de cinématique inverse résolu par une programmation non linéaire avec contraintes.

Des simulations, impliquant des personnes âgées et/ou ayants des prothèses, permettent de valider la démarche proposée pour les deux stratégies d'entrée. Malgré les différences avec les mouvements mesurés, les mouvements simulés sont conformes aux sous stratégies adoptées par les sujets lors des expérimentations. De plus, les simulations réalisées permettent d'expliquer en partie les changements de stratégie opérés par certains sujets, lors des expérimentations, suite au changement de véhicule automobile. Enfin, des simulations sur des véhicules fictifs montrent les limites de l'outil de simulation développé.

Ce travail ouvre plusieurs perspectives de recherches tant concernant l'amélioration de la simulation, en considérant par exemple les différences intra- individuelles des sujets ou encore la dynamique du mouvement, que l'élaboration de nouveaux indices ergonomiques afin d'estimer l'inconfort associé aux mouvements simulés.

Mots clés : Modélisation biomécanique, analyse statistique, stratégie motrice, planification de trajectoires, cinématique inverse, simulation du mouvement, accessibilité automobile, personnes âgées et/ou handicapées.

Modelling, analysis and simulation of car-entering movement in variably-dimensioned vehicles: Application to elderly and/or disabled people car-entering movement.

Abstract: The difficulty from which suffer elderly and/or disabled people when entering or exiting an automobile vehicle can lead them to never use it again. The car manufacturers are conscious of this fact and they are more and more interested in these growing elderly and/or disabled populations prone to locomotor apparatus disorders and in this complex gesture requiring a precise coordination of the human body articular movements. An alternative to understand and predict this movement is to use the digital simulation.

Works completed in this thesis fall under this context and concern the kinematic simulation of the vehicle entering movement of a humanoid (constituted of a head, a trunk, a basin and lower limbs) in variably-dimensioned vehicles by using real data resulting from the experimentation. To solve this "complex" problem, we propose a three stage methodological procedure. A first stage carries on the constitution of a base of movements that we name "exploitable" movements which are issued from the experimentation carried out on two variably-dimensioned vehicles. These "exploitable" movements are the result of digital processing applied to the measured entry movements. These processing allow, among others, to adapt the measured joint articulation angles to the humanoid in order to avoid possible collisions with the cockpit which would not have been noted during the experiments. A second stage relates to the automatically analysis and identification of the vehicle entering movement strategies. This stage proceeds in four phases and it allows the identification of 2 entry movement strategies and 6 sub-strategies. A third stage, made up of 4 phases as well, uses the assets resulting from stages 1 and 2 to simulate an entry movement of a subject of the base adopting a given sub-strategy in another vehicle of different geometry. The simulation of the entry movement of the same subject in another vehicle concerns an inverse kinematics problem solved by constrained nonlinear programming.

Simulations, implying elderly and/or having prostheses people, make it possible to validate the suggested procedure for the two entry strategies. In spite of the differences with the measured movements, the simulated movements are in conformity with the sub-strategies adopted by the subjects during the experiments. Furthermore, the realized simulations make it possible to explain partly the changes of strategy operated by some subjects, during the experiments, when shifting from one vehicle to another. Finally, simulations on fictitious vehicles show the limits of the developed simulation tool.

This work opens several prospects for research as well concerning the improvement of simulation, by considering for example the intra-individual differences of subjects or the dynamics of the movement, as the development of new ergonomic indices in order to consider discomfort associated with the simulated movements.

Keywords: Biomechanical modelling, statistical analysis, motion strategies, trajectory planning, inverse kinematics, movement simulation, vehicle accessibility, elderly and/or disabled persons.

