



HAL
open science

Définition et réalisation d'outils de modélisation et de calcul de mouvement pour des humanoïdes virtuels

Nicolas Pronost

► **To cite this version:**

Nicolas Pronost. Définition et réalisation d'outils de modélisation et de calcul de mouvement pour des humanoïdes virtuels. Modélisation et simulation. Université Rennes 1, 2006. Français. NNT : . tel-03542872

HAL Id: tel-03542872

<https://hal.science/tel-03542872>

Submitted on 25 Jan 2022

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.

N° d'ordre: 3452

THÈSE

Présentée devant

devant l'Université de Rennes 1

pour obtenir

le grade de : DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE RENNES 1
Mention INFORMATIQUE

par

Nicolas PRONOST

Équipe d'accueil : SIAMES-IRISA

École Doctorale : Matisse

Composante universitaire : IFSIC

Titre de la thèse :

*Définition et réalisation d'outils de modélisation et
de calcul de mouvement pour des humanoïdes virtuels*

soutenue le 7 décembre 2006 devant la commission d'examen

M. :	Yves	BEKKERS	Président
MM. :	Sylvie	GIBET	Rapporteurs
	Yannick	RÉMION	
MM. :	Qunsheng	PENG	Examineurs
	Georges	DUMONT	
	Bruno	ARNALDI	

Remerciements

Je tiens à remercier tout d'abord l'ensemble des membres de mon jury. En commençant par mes deux rapporteurs de thèse Sylvie Gibet et Yannick Rémion, je les remercie d'avoir acceptés cette tâche et d'avoir soulevés de nombreuses remarques passionnantes. Xiè xiè Professor Peng, d'avoir participé à ce jury mais aussi de m'avoir accueilli à Hangzhou avec tant de gentillesse et de disponibilité, *tào rǎo*. Je remercie bien évidemment Bruno Arnaldi, mon directeur de thèse et Georges Dumont, mon encadrant de thèse, pour toutes ces années de conseils, tant sur l'aspect recherche de ma thèse que sur le métier d'enseignant chercheur. Et enfin merci à Yves Bekkers d'avoir accepté la présidence de ce jury.

Je remercie également les personnes avec qui il m'ait été donné de collaborer, et de m'ouvrir ainsi à d'autres horizons. Je tiens donc à saluer les membres du Projet ATIP-Lucy, et en particulier Gilles Berillon, j'en sais un peu plus sur la paléanthropologie dorénavant. Je remercie également les "info-biomécaniciens" de Rennes 2 : Franck, Richard et Guillaume d'avoir toujours été là pour m'aider et me conseiller. Et je salue par la même occasion tout le groupe bioméca du LPBEM.

Un grand merci également à tous les membres du projet SIAMES/Bunraku pour m'avoir accueilli si amicalement. Je tiens à remercier en particulier les personnes qui sont devenus plus que des collègues de bureau, et il y en a beaucoup, je vais donc n'en citer que quelques uns. Merci donc à Thierry (cobural mémorable), Caro la sportive, Mathieu le vrai mécano, Vincent, Nico Navette, Xavier... Je tiens à remercier avec une mention particulière, deux doctorants qui m'ont accompagnés à tous les niveaux pendant ces années : Seb et Marwan. Merci les gars pour tous les moments que l'on a passés ensemble. Je tiens aussi à remercier Jean-Marie "birdie-man" Souffez, pour avoir partagé bureau, fairway, soirées et terrains de foot avec moi.

Je félicite de plus tous mes amis, plus anciens, pour leur bonne humeur et leur compréhension face aux exigences que j'ai pu leur faire subir. Merci donc à Marie, Floflo, Anna, Flo, Gus et les autres, et j'espère que vous avez aussi compris un petit peu ce que je faisais. Et enfin je tiens à remercier les membres de ma famille, père, mère et sœur, pour leur soutien. Voilà un docteur de plus dans la famille!

Table des matières

Table des matières	0
Table des figures	5
Introduction	9
1 Vue générale	11
1.1 Contexte	11
1.1.1 Analyse et synthèse du mouvement humain	11
1.1.2 Mécanique et biomécanique	12
1.1.3 Cinématique et dynamique	13
1.2 Objectifs de la thèse	13
1.2.1 Modélisation de l'humain	14
1.2.2 Modélisation du mouvement	15
1.2.3 Méthodes d'adaptation, d'analyse et de synthèse	15
1.2.4 Applications	17
1.3 Plan du mémoire	18
2 Analyse, adaptation et synthèse de mouvements d'humanoïdes	19
2.1 Introduction	19
2.2 Modélisation d'un humanoïde	19
2.2.1 Représentation hiérarchique	20
2.2.2 Ajout de connaissances biomécaniques	21
2.3 Familles de méthodes de calcul	24
2.3.1 Méthodes de cinématique directe et inverse	24
2.3.2 Méthodes de cinétique et de contrôle du centre de masse	27
2.3.3 Méthodes de dynamique directe et inverse	29
2.3.4 Utilisation de mouvements capturés	31
2.3.4.1 Adaptation à de nouveaux personnages	32
2.3.4.2 Modification de mouvement	34
2.3.4.3 Combinaison de mouvements	35
2.3.4.4 Utilisation et validation de base de données	39
2.4 Cas de la locomotion humaine	41
2.5 Résumé	43

3	Adaptation cinématique dimensionnelle	47
3.1	Modélisation de la locomotion	48
3.1.1	Définition des centres articulaires	49
3.1.2	Représentation paramétrique : la poulaine	50
3.1.3	Construction de la base de données de mouvements capturés	53
3.2	Définition d'une chaîne cinématique	53
3.2.1	Degrés de liberté d'un squelette humain	53
3.2.2	Déclinaison dans un cadre applicatif	54
3.3	Principe d'interpolation	56
3.3.1	Caractéristiques morphologiques et locomotrices	56
3.3.2	Algorithme d'interpolation	58
3.3.3	Utilisation d'un profil de vitesse	59
3.4	Post-traitements	60
3.4.1	Synchronisation latérale	60
3.4.2	Calcul des postures par cinématique inverse	63
3.4.3	Préparation à l'animation	65
3.5	Résultats	67
3.5.1	Validation de l'interpolation	67
3.5.2	Validation de l'adaptation	68
3.5.3	Simulations applicatives	71
3.5.4	Discussions et conclusion	75
4	Évaluation de la dynamique	77
4.1	Création d'un modèle biomécanique	78
4.1.1	Le modèle mécanique	79
4.1.2	Les paramètres segmentaires physiques	80
4.2	Reconstruction du mouvement articulaire	82
4.2.1	Principe de projection	82
4.2.2	Reconstruction séquentielle	83
4.3	Détermination des phases d'appui au sol	83
4.3.1	Évaluations de différentes méthodes	84
4.3.2	Résultats de la reconnaissance d'appui au sol	85
4.4	Principe Fondamental de la Dynamique	87
4.4.1	Calcul des centres de masse	87
4.4.2	Principe d'isolement et seconde loi de Newton	88
4.4.3	Résolutions des équations des torseurs	89
4.5	Validation	91
4.5.1	Validation de la résolution en dynamique inverse	91
4.5.2	Influence de l'adaptation morphologique	92
4.5.2.1	Mise à l'échelle globale	93
4.5.2.2	Ratio fémur/tibia	95
4.5.2.3	Structure du squelette	96
4.5.3	Influence de l'interpolation	97
4.5.3.1	Longueur de pas	98

4.5.3.2	Style de mouvement	98
4.5.3.3	Vitesse de déplacement	99
4.6	Exemple d'application : transport de charges	99
4.7	Conclusion	101
5	Synthèse par dynamique directe normalisée	103
5.1	Normalisation des torseurs	103
5.1.1	Cadre d'étude et questions	103
5.1.2	Principes et résultats	104
5.2	Méthode de dynamique directe	108
5.2.1	Propriétés caractéristiques	109
5.2.2	Validation par les morphologies et par les torseurs normalisés	112
5.2.3	Résultats préliminaires sur l'humain	113
5.3	Conclusion	114
	Conclusion et perspectives	115
	A Courbes de Coons paramétrée	119
	B Profil de vitesse et abscisse curviligne	121
	C Statistiques des reconnaissances d'appui au sol	123
	D Quelques méthodes d'évaluation statistiques	125
D.1	Méthodes d'évaluation métriques	126
D.1.1	Erreur RMS d'ordre p	126
D.1.2	La moyenne des distances Euclidiennes	126
D.1.3	Erreur type de prévision	127
D.1.4	Distance de Mahalanobis	127
D.2	Méthodes d'évaluation de la ressemblance	127
D.2.1	Dérivée première	128
D.2.2	Coefficient de corrélation	128
D.2.3	Matrice de corrélation d'ACP	129
	Glossaire et notations	131
	Bibliographie	146

Table des figures

1.1	Schéma du principe de la boucle analyse/synthèse, d'après [Mul98].	11
1.2	Proposition d'une chaîne complète de modélisation et de calcul de mouvement.	14
1.3	Le module d'adaptation produit un mouvement conforme aux contraintes imposées.	16
1.4	Principe d'analyse dynamique d'un mouvement.	16
1.5	Principe de synthèse dynamique d'un mouvement.	17
1.6	Schéma d'évaluation de la pertinence de torseurs normalisés.	18
2.1	Classification des types de liaisons mécaniques.	21
2.2	Représentation hiérarchique d'un squelette humain. Le nœud racine, <i>vt1</i> , est placé au bassin, chaque nœud est exprimé par rapport à son parent dans la hiérarchie [HA06].	22
2.3	Représentation normalisé d'un squelette humain [Mén03].	22
2.4	Études de Marey sur le saut à la perche et sur la course [Mar94].	24
2.5	Cinématique inverse sur des chaînes à deux et trois segments	26
2.6	Utilisation de la cinétique inverse pour contrôler la position du CdM	28
2.7	Maintien de l'équilibre [TSK00]	28
2.8	Problème d'adaptation à des morphologies différentes	32
2.9	Adaptation d'un mouvement de marche à différents squelettes [Gle98].	33
2.10	Utilisation d'un squelette intermédiaire pour l'adaptation morphologique [MBBT00].	33
2.11	Utilisation de splines hiérarchiques pour effectuer une adaptation morphologique	34
2.12	Graphe de mouvements [LL04]	36
2.13	Déformation dynamique du temps [GR96]	38
2.14	Un exemple de trajectoire articulaire décrite à partir de quatre trajectoires de référence [GR96].	39
2.15	Phases caractéristiques de la marche humaine.	42
2.16	Synopsis du système de locomotion de Multon [Mul98].	42
3.1	Vision globale de la méthode d'adaptation	48
3.2	L'exemple de la définition de l'articulation du genou	50
3.3	Points caractéristiques d'une poulaine	51

3.4	Poulaines réelles et reconstruites	52
3.5	Définition de la chaîne cinématique	54
3.6	Quelques articulations du corps humain	55
3.7	Le squelette de Lucy	55
3.8	Anatomie comparée du Singe, de l'Homme et de Lucy	56
3.9	Étapes de la reconstruction 3D du squelette de Lucy [MB01]	57
3.10	Panel de postures utilisé dans la base de données	58
3.11	Paramètres influents de l'adaptation dimensionnelle	59
3.12	Profil de vitesse, polynôme et erreur	60
3.13	Synchronisation latérale des poulaines	61
3.14	Synchronisation latérale par minimisation des différences verticales	62
3.15	Fonction de coût des butées articulaires	64
3.16	Les différents cas de reconstruction de l'angle de la cheville	66
3.17	Angle simulé de la cheville droite	66
3.18	Calcul du haut du corps par poulaine des mains	67
3.19	Validation de l'interpolation	68
3.20	Angles simulés pour le sujet 3	69
3.21	Repères anatomiques de rotation	70
3.22	Angles réels et simulés pour le sujet 5	71
3.23	Extraits de simulations de locomotions adaptées	72
3.24	Traces de pas de Laetoli	72
3.25	Amplitudes maximales des articulations inférieures	73
3.26	Trajectoires articulaires d'une locomotion plausible de Lucy (A.L. 288-1)	74
3.27	La poulaine adaptée aux hypothèses paléoanthropologiques	74
3.28	Diagrammes de phases de Lucy	75
4.1	Vue générale du système d'analyse	78
4.2	Quelques étapes clés de la méthode d'analyse de la dynamique	79
4.3	La représentation modifiée de Denavit-Hartenberg [KK86]	80
4.4	Un modèle mécanique de squelette humain avec la notation modifiée de Denavit-Hartenberg	81
4.5	Résultats de l'algorithme de projection de mouvement	84
4.6	Trajectoire verticale et sagittale de l'orteil dans le repère du talon	85
4.7	Calcul du centre de masse global de l'humanoïde	87
4.8	Principe d'isolement appliqué au pied en appui	88
4.9	Ordre d'évaluation des équations selon l'état d'appui	89
4.10	Comparaison des FRS d'adaptations vides et de données expérimentales	92
4.11	Torseurs de locomotions réelles analysées	93
4.12	Forces de réaction au sol de différents types de locomotions	94
4.13	Influence d'une mise à l'échelle globale	95
4.14	Influence du ratio fémur/tibia	96
4.15	Somme des distances Euclidiennes entre les positions des centres de gravité des 11 membres	97
4.16	Influence de la structure du squelette	97

4.17	Influence de la longueur de pas	98
4.18	Influence du style de mouvement	99
4.19	Influence de la vitesse de déplacement de l'humanoïde	100
4.20	Forces nécessaires à un transport de charge conservant le mouvement . .	101
4.21	Comparaison des forces initiales et modifiées lors du transport de charge	101
5.1	Composantes latérale, horizontale et verticale du centre du bassin	106
5.2	Composantes latérale, horizontale et verticale des FRS normalisées . . .	107
5.3	Tracé de pression moyen sur le pied durant une phase d'appui	108
5.4	Principe de fonctionnement de la synthèse en dynamique directe	109
5.5	Positions et angles d'un système à pendule contraint	111
5.6	Couple moteur nécessaire pour contraindre le mouvement	111
5.7	Angle issu de la simulation en dynamique directe pilotée par le couple moteur	112
5.8	Principe de validation de la dynamique inverse/directe normalisée	113
5.9	Extrait d'une simulation en dynamique directe sur l'humain	113
A.1	Courbe de Coons	119
B.1	Profil de vitesse et abscisse curviligne.	121
D.1	Cas problématique des méthodes métriques d'évaluation des distances .	128

Introduction

L'étude de l'humain est un des fondements de la compréhension du mouvement. Son analyse et sa synthèse restent des problèmes cruciaux dans de nombreux domaines de recherche allant de la robotique à la biomécanique en passant par la médecine, les neurosciences et l'anthropologie. Le réalisme de ces mouvements est un point hautement délicat et complexe car nous avons l'habitude d'observer, quotidiennement, des mouvements parfaitement réalistes puisque réels. Notre chaîne de perception est donc très critique quand à la crédibilité d'animations, et particulièrement en ce qui concerne les mouvements humains. L'animation manuelle, image par image, étant très fastidieuse et dépendante du savoir faire de l'animateur, il apparaît comme indispensable d'assister la création d'animation par des moyens informatiques de modélisation et de calcul de mouvements.

Pour que la création de mouvements soit faite de la façon la plus générique possible, il est nécessaire de caractériser, et donc de modéliser, l'humain le plus fidèlement possible. Le principe même, soutenant l'analyse et la synthèse de mouvements humains, possède alors trois aspects fondamentaux :

- la modélisation de l'humain : il est indispensable, lorsque l'on travaille sur la compréhension et la simulation de mouvements, d'avoir une représentation symbolique des personnages. Cette représentation peut décrire la hiérarchie et les relations entre les différentes parties du corps mais également la façon quantitative dont elles sont capables de se mouvoir ;
- la modélisation du mouvement : pour être manipulé, le mouvement doit être représenté de manière mathématique. Les méthodes pour le faire sont multiples, même au sein d'un unique processus de traitement, afin de pouvoir appliquer les méthodes de calculs associées ;
- les méthodes de calculs : qu'elles soient basées sur la cinématique ou sur la dynamique, il est important que les méthodes de calculs offrent des possibilités de généralité que se soit sur les personnages utilisés ou sur leurs mouvements.

C'est sous cette architecture que nous présenterons ce travail de thèse.

Bien que l'animation de mouvements humains ne soit pas une préoccupation récente dans le domaine du graphisme - elle est apparue il y a environ 35 ans [BW71] - la recherche d'une méthode pratique pour résoudre cette tâche n'est pas terminée. Les progrès réalisés durant ces années sont considérables : partant d'un petit domaine de

recherche ayant peu d'applications pratiques, l'animation de personnages est devenue un des domaines les plus étudiés et les plus utilisés en informatique graphique.

Une des principales raisons de la complexité de l'analyse et de la synthèse du mouvement humain réside dans le fait que ce mouvement est le résultat d'une combinaison de nombreux processus couplés les uns aux autres tels que l'activité musculaire, les phénomènes physiologiques ou les contraintes biomécaniques, et dont certains sont peu décrits ou modélisés. La nature même de ces processus et leurs interactions rendent très difficile la création d'un ensemble homogène de connaissances permettant une analyse et une synthèse génériques. Il semble donc pertinent de se pencher sur des approches pluridisciplinaires afin d'appréhender au mieux cet aspect de l'étude de l'humain. C'est avec cette vision que, dans ce travail de thèse, nous avons étudié et utilisé certains aspects, utiles à l'animation, issus d'autres domaines. Nous nous sommes par exemple intéressés à des représentations mathématiques, à des modélisations issues de la robotique, à des lois biomécaniques et à des principes physiques. Ces aspects nous ont aussi amené à nous intéresser à l'intersection de différents domaines d'applications comme la biomécanique, la paléanthropologie, la simulation physique ou l'animation.

Le développement des systèmes de capture de mouvement a énormément influencé les recherches récentes en animation d'humains virtuels. En effet, les mouvements capturés sont intrinsèquement réalistes puisque réels, ce qui est le but final de l'animation. La construction et l'utilisation d'une base de données réelles est alors un excellent moyen de travailler sur des paramètres réalistes, mais au détriment de son adaptation qui devient alors plus difficile. L'analyse des mouvements de cette base de données est alors primordiale puisque elle permet d'évaluer les informations nécessaires aux adaptations que l'on souhaite y apporter. Ces adaptations peuvent être de plusieurs ordres, mais le principal consiste à intervenir sur le mouvement pour le faire correspondre à des contraintes telles qu'une morphologie différente, un environnement modifié ou à de nouvelles propriétés physiques du corps. Bien que respectant les contraintes imposées, toutes ces modifications peuvent entraîner une inexactitude des propriétés, en particulier physiques, du mouvement. Une méthode pour remédier à cet inconvénient, qui est celle que nous présentons dans cette étude, se base sur la caractérisation et l'adimensionnement des paramètres influents des modifications afin d'interpoler, de produire et de valider de nouveaux mouvements.

Chapitre 1

Vue générale

Dans ce premier chapitre, nous exposons une vue générale des études réalisées et des méthodes utilisées. Nous résumons notre travail de thèse en indiquant le contexte et les objectifs de nos approches. Nous mettons également en évidence nos contributions et leurs champs d'applications.

1.1 Contexte

Les approches présentées dans ce mémoire s'inscrivent dans le domaine de l'étude et de l'animation de personnages humains virtuels, appelés humanoïdes. De nombreuses applications se placent dans ce cadre, comme les animations comportementales ou les animations en réalité virtuelle interactives ou non. Nous sommes donc dans un contexte de compréhension et de reproduction de phénomènes naturels de mouvement humain tel que la locomotion. Une approche combinant l'analyse, pour la compréhension, et la synthèse, pour la reproduction, s'impose alors [Gib02].

1.1.1 Analyse et synthèse du mouvement humain

Le principe de l'association entre l'analyse et la synthèse (Figure 1.1) permet d'obtenir un processus global stable et cohérent pour l'animation d'humanoïdes. Toutes les étapes de ce processus sont accessibles, définissables, utilisables et permettent de produire un boucle cohérente.

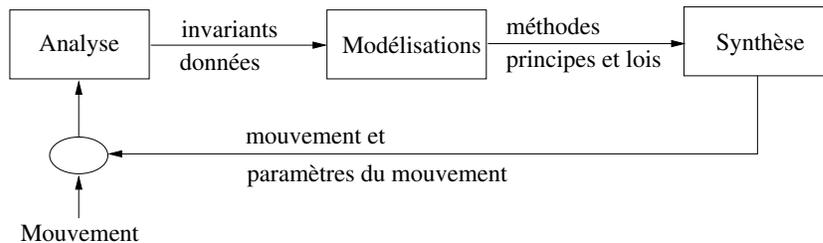


FIG. 1.1 – Schéma du principe de la boucle analyse/synthèse, d'après [Mul98].

En partant de mouvements donnés, qu'ils soient capturés ou édités, l'analyse permet d'extraire des invariants et des données. Les invariants, pour un type de mouvement précis, sont en général bien connus dans le domaine de la biomécanique que se soient des méthodes de calculs ou des lois (voir section 2.3). Un certain nombre de données, plus spécifique au mouvement lui-même, peuvent également être évaluées, comme les trajectoires articulaires, les instants de contacts avec l'environnement et d'inter/intra pénétrations ou encore des données physiques.

Toutes ces données nous aident à construire deux modélisations : celle de l'humanoïde lui-même et celle de son mouvement. Ces modélisations dépendent de l'utilisation que l'on souhaite en faire. Par exemple, lorsque nous nous intéresserons à l'adaptation cinématique (au chapitre 3), l'humanoïde sera représenté par une simple chaîne articulée et son mouvement sera représenté par une unique trajectoire, celle d'une des extrémités de la chaîne. Puis lorsque nous nous intéresserons à la validation et la synthèse par la dynamique (aux chapitres 4 et 5), le modèle de l'humanoïde sera enrichi de paramètres physiques et son mouvement sera décrit par des angles aux articulations. Le modèle utilisé sera ainsi toujours adapté à l'utilisation que l'on en fait.

À partir des modélisations et de différents invariants (méthodes et lois), il est alors possible de synthétiser des mouvements humains. Les méthodes de synthèse utilisées dans notre travail sont de deux types. Le premier type se base sur le principe d'adaptation de mouvements réels (voir section 2.3.4) en effectuant des interpolations dans une base de données. Le second type de méthode de synthèse utilisé repose essentiellement sur le principe de dynamique directe (voir section 2.3.3).

Les mouvements ainsi synthétisés peuvent eux-mêmes être analysés, que ce soit à des fins de validation ou d'enrichissement des invariants et des données donc de l'amélioration de la synthèse. Nous obtenons bien ainsi une boucle cohérente de traitement et de production de mouvements.

1.1.2 Mécanique et biomécanique

Lors de l'analyse aussi bien que lors de la synthèse, l'apport de modèles et de données mécaniques appliquées à l'humain permet une meilleure prise en compte des phénomènes complexes qui régissent l'activité humaine. En effet, l'un des principaux inconvénients d'approches génériques d'animation réside dans le manque de connaissances concernant les données spécifiques à l'humain virtuel et au type de mouvement. Cet aspect est en particulier observé dans des méthodes issues du traitement du signal ou de la statistique (ACP), où les mouvements sont représentés de manière générique indépendamment de leurs données particulières. Le fait de spécialiser une technique la rend évidemment moins générique, mais permet par contre de prendre en compte les phénomènes précis que l'on veut analyser ou simuler.

Par exemple, dans cette étude, le fait de spécialiser nos approches sur la locomotion humaine, ne nous permet pas d'assurer leurs fonctionnalités sur d'autres types de mouvement, par contre, cela nous permet de prendre en compte certains aspects spécifiques tels que le déroulement des phases d'appui, les paramètres de la locomotion comme les empreintes ou les postures, et la présence de forces extérieures.

L'apport de connaissances provenant de la mécanique et de la biomécanique peut alors être utile :

- Pour la modélisation. Un modèle d'humanoïde est réellement exploitable par des algorithmes qui le manipulent lorsqu'il est décrit sous forme d'un squelette poly-articulé. La représentation mécanique d'un tel système à corps solides est donc très généralement utilisée. Lorsque les méthodes de manipulation nécessitent des calculs portant sur la dynamique ou sur la cinétique (calculs de centres de masse, de coûts énergétiques, de torseurs), le modèle doit être enrichi par des données physiques telles que les masses, inerties, butées articulaires ou forces internes maximales. On peut alors parler de modèle biomécanique du squelette (voir section 2.2.2).
- Pour la production de mouvements. La plupart des méthodes de production de mouvements (par images clés, édition, interpolation, adaptation ou mélange) se basent sur un ensemble de lois mécaniques permettant entre autres de décrire une posture et son évolution dans le temps. Mais ces méthodes de production peuvent être enrichies par d'autres lois mécaniques et biomécaniques. Dans cette étude, nous utilisons, par exemple, le Principe Fondamental de la Dynamique, mais également des valeurs moyennes empiriques et des lois de régression linéaire de calculs de masses, d'inerties et d'énergie mécanique (voir sections 4.1 et 4.4).

1.1.3 Cinématique et dynamique

En général, on appelle modèle cinématique d'animation, tout modèle cherchant à associer un comportement donné à la description de ses effets. On appelle modèle dynamique d'animation, tout modèle exprimant le mouvement sous forme de systèmes d'équations différentielles décrivant le lien entre ses causes et ses effets [Arn89, Dum90, Rém00]. Par l'analyse de l'état de l'art du chapitre 2 et la mise en place de nos approches, nous vérifions également que les techniques dites directes sont généralement utilisées pour la synthèse du mouvement et les techniques dites inverses pour son analyse. Le passage par ces types d'approches est inévitable lorsque l'on travaille sur un mouvement isolé. Mais il est possible d'utiliser d'autres moyens, comme des interpolations, dans le cadre d'une synthèse utilisant une base de données précalculée (voir section 2.3.4).

Dans notre approche, nous utilisons ces trois aspects : interpolation, simulation cinématique et simulation dynamique. Nous allons voir maintenant quels sont les motivations de ce travail de thèse et comment nous abordons les méthodes choisies pour répondre à nos objectifs.

1.2 Objectifs de la thèse

L'objectif principal de la thèse est d'étudier, et de réaliser, une chaîne complète d'outils de modélisation et de calcul de mouvement (voir Figure 1.2) que nous appliquons à la locomotion.

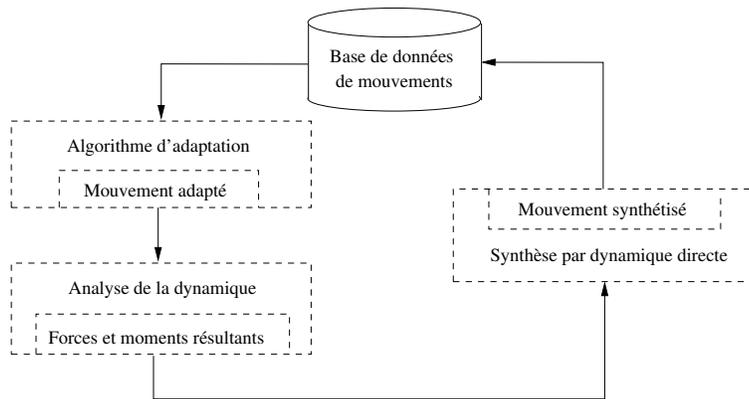


FIG. 1.2 – Proposition d’une chaîne complète de modélisation et de calcul de mouvement.

Hormis la construction de la base de données de mouvements, le travail proposé se compose de trois parties.

1. L’algorithme d’adaptation (Chapitre 3). Il a pour but de calculer un mouvement correspondant à certains critères tels que la morphologie, la longueur de pas ou la posture de repos. Il utilise la base de données dans laquelle il effectue des interpolations.
2. L’analyse de la dynamique (Chapitre 4). Elle a pour objectif de calculer les forces et moments qui ont engendrés le mouvement analysé. Elle utilise une description biomécanique de l’humanoïde et s’appuie sur les principes fondamentaux du mouvement.
3. La synthèse par dynamique directe (Chapitre 5). Les forces et moments évalués précédemment en sont les points d’entrées. Un module de résolution des équations du mouvement est utilisé pour calculer le mouvement associé. Une mesure quantitative de la différence entre ce mouvement et les mouvements réels de la base de données est alors introduite, reposant sur une approche croisée entre distance et ressemblance. Si le mouvement adapté est suffisamment réaliste, il peut alors enrichir la base de données.

Pour atteindre cet objectif, nous nous sommes intéressés à plusieurs sous-objectifs plus précis dont la modélisation de l’humain et de son mouvement et la définition de différentes méthodes de traitement et de leurs apports.

1.2.1 Modélisation de l’humain

Le corps humain est composé d’os, de muscles, d’organes, de tissus mous et de peau ainsi que de structures décisionnelles et de transmission des commandes. Il est actuellement impossible de modéliser et de contrôler finement un tel système. Il faut donc trouver une représentation simplifiée de l’humanoïde, qui soit à la fois réaliste et contrôlable.

Nous utilisons deux niveaux de modélisation adaptés aux différents traitements envisagés.

- Lorsque l’on travaille sur des méthodes d’adaptations cinématiques, un modèle hiérarchique articulaire classique suffit. La description des articulations est donnée sous forme de matrices homogènes de passage définies par des paramètres de l’interpolation. Cette modélisation en chaîne articulaire est, de plus, bien appropriée à des calculs de cinématique directe et inverse (voir section 2.3.1).
- Lorsque l’on travaille avec des méthodes dynamiques, nous enrichissons le modèle avec les paramètres physiques (masses et inerties des membres) nécessaires aux calculs. La méthode d’enrichissement que nous proposons est automatique, elle repose sur l’utilisation de données anthropométriques moyennes et de lois génériques.

1.2.2 Modélisation du mouvement

L’animation d’humanoïdes synthétiques nécessite une représentation précise des mouvements sur lesquels elle s’appuie. La manière la plus intuitive d’obtenir des mouvements réalistes est de les mesurer directement sur les êtres humains. C’est ce qu’on appelle la capture de mouvements. Le moyen le plus communément rencontré pour capturer des mouvements est d’utiliser un système opto-électronique, où un ensemble de caméras infrarouges capte les positions de marqueurs passifs placés sur le corps (voir section 3.2). C’est par ce moyen, un système Vicon[®] de la société Oxford Metrics constitué de 6 caméras infrarouges échantillonnées à 60 Hz, que nous capturons nos mouvements et que nous enrichissons notre base de données.

La représentation brute de ce type de données, c’est-à-dire des positions tridimensionnelles de marqueurs, est difficilement exploitable directement. Notre méthode d’adaptation utilise des positions 3D prétraitées issues de ces données. En effet, la trajectoire utilisée pour l’adaptation cinématique est celle d’une articulation exprimée dans un repère local particulier de l’humanoïde.

En revanche, les méthodes d’analyse et de synthèse dynamiques ne peuvent pas s’effectuer sur une telle représentation. En effet, ces méthodes utilisent des données telles que les vitesses et accélérations angulaires, nous devons donc modéliser le mouvement non pas par une succession de postures 3D (données tridimensionnelles en position) mais par l’évolution dans le temps des angles des systèmes articulaires (données en rotation).

1.2.3 Méthodes d’adaptation, d’analyse et de synthèse

Dans notre étude sur la modélisation et le calcul du mouvement (voir Figure 1.2), la première étape est de produire un mouvement adapté à certaines contraintes extérieures.

Ces contraintes sont des hypothèses sur le mouvement et sur la morphologie (voir Figure 1.3). L’objectif du module d’adaptation est de produire un mouvement respectant un ensemble de contraintes imposées. Les données anatomiques, les empreintes et la posture sont des contraintes pour l’interpolation, la cinématique inverse doit elle tenir compte de la posture et des butées articulaires [PNDM05].

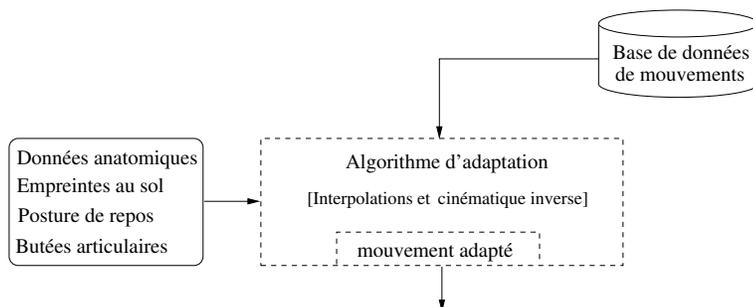


FIG. 1.3 – Le module d’adaptation produit un mouvement conforme aux contraintes imposées.

L’étape suivante de la chaîne de calcul est l’analyse dynamique (voir Figure 1.4). Nous devons en premier lieu créer un modèle biomécanique, dans notre étude ce modèle contient les informations de masses et d’inerties des membres. Nous les évaluons grâce à des tables anthropométriques et des lois de régression liant les paramètres physiques aux paramètres géométriques des membres. Le modèle obtenu est alors associé au mouvement, et, par résolution des principes fondamentaux du mouvement, nous évaluons les forces et moments résultants [PD06].

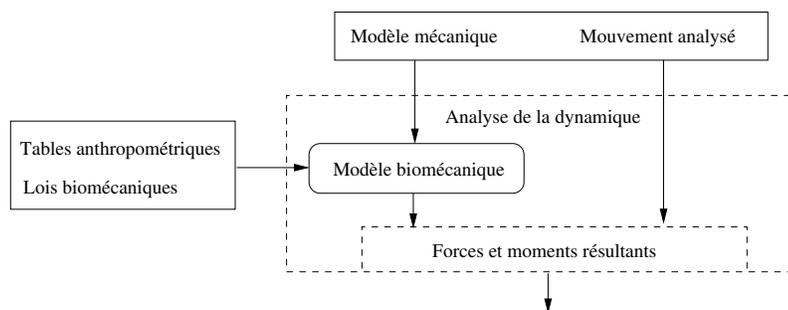


FIG. 1.4 – Principe d’analyse dynamique d’un mouvement.

Le prochain sous-objectif est de produire, en particulier à des fins de validation, le mouvement correspondant aux torseurs d’efforts appliqués aux articulations (voir Figure 1.5). Le modèle utilisé en entrée est un modèle mécanique basé sur la description des corps rigides et des liaisons qui les lient. Le principe, décrit par les équations du mouvement, de simulation en dynamique directe est alors appliqué afin d’obtenir le mouvement associé.

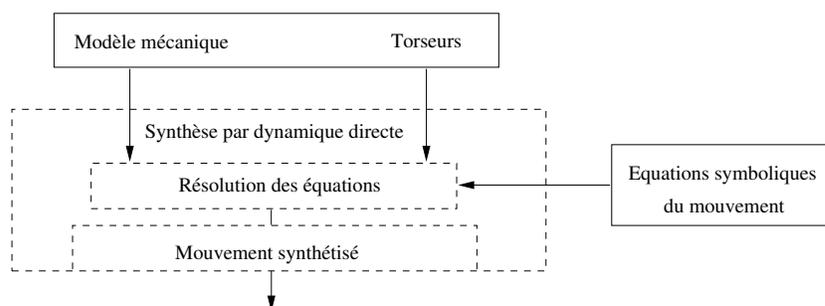


FIG. 1.5 – Principe de synthèse dynamique d'un mouvement.

Nous pouvons maintenant mettre en évidence nos principales contributions : (1) une méthode d'adaptation de mouvement basée sur une interpolation multidimensionnelle dans une base de données de locomotions (Chapitre 3), (2) la description d'un processus automatique, générique et indépendant, calculant la dynamique d'une locomotion et incluant l'évaluation des paramètres du mouvement et de l'humain (Chapitre 4), (3) la génération, en dynamique directe, de locomotions à partir de données physiques adimensionnées et l'évaluation de leurs réalismes (Chapitre 5).

1.2.4 Applications

L'un des objectifs de notre travail est d'offrir des outils de test et de validation qui permettent la reproduction et la compréhension de phénomènes naturels. C'est dans cet optique, qu'a été créé en octobre 2003, un projet ATIP¹ CNRS regroupant deux laboratoires de paléanthropologie (UPR 2147 et UMR 6578), un laboratoire de biomécanique (LPBEM) et un laboratoire d'informatique (IRISA). Il s'est organisé autour du thème : "Évaluer les aptitudes locomotrices des Hominidés fossiles. Modéliser et simuler la bipédie de Lucy, *Australopithecus afarensis*". Notre participation à ce projet s'est axée sur la production d'un outil de test d'hypothèses anthropologiques utilisant notre approche d'adaptation cinématique de mouvement [PDBN06] (voir section 3.5.3).

L'une des applications possibles provenant de l'association entre analyse et synthèse par la dynamique consiste à étudier l'influence de certains paramètres physiques. Nous l'illustrerons en étudiant l'influence d'un transport de charge sur les forces et moments aux articulations (voir section 4.6).

Une seconde application possible est l'évaluation de la pertinence de torseurs normalisés (voir Figure 1.6). Le principe est le suivant : à partir de n mouvements, l'analyse dynamique nous fournit n morphologies associées et n évolutions de torseurs. Si la normalisation de ces n évolutions de torseurs par les morphologies nous produit n évolutions de torseurs identiques, le principe d'association d'un profil adimensionné de torseurs à un mouvement peut être validé (voir section 5.1). Les conséquences et applications sont

¹ATIP : Action Thématique et Incitative sur Programme

multiples, en particulier en terme d'animation cinématique où la donnée de paramètres physiques, même adimensionnés, peut étayer les décisions et les calculs des mouvements.

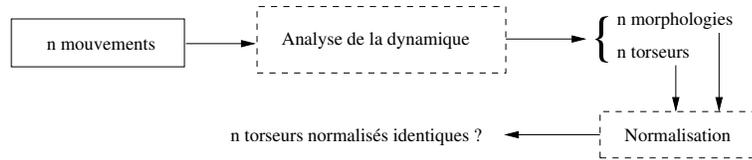


FIG. 1.6 – Schéma d'évaluation de la pertinence de torseurs normalisés.

1.3 Plan du mémoire

Le document est organisé de la manière suivante. Le chapitre 2 dresse la revue de littérature concernant l'animation d'humanoïdes synthétiques en se focalisant sur les méthodes d'analyses, d'adaptations et de synthèses généralement utilisées, et en particulier sur celles concernant la locomotion humaine. L'analyse de l'état de l'art nous a conduit, au regard de nos objectifs d'étude d'une chaîne complète d'analyse/synthèse de locomotions, à nous concentrer sur une méthode d'adaptation basée sur des interpolations dans une base données de mouvements (chapitre 3). Cette méthode ne tenant pas compte des propriétés physiques du mouvement, nous nous sommes ensuite intéressés à l'analyse du respect des lois de la dynamique dans de tels mouvements, ainsi qu'à l'étude de l'influence de l'adaptation sur leurs dynamiques (chapitre 4). Puis, au chapitre 5, nous traitons de la manière de reproduire un mouvement par sa dynamique grâce aux couples moteurs et aux forces extérieures. Nous concluons ce mémoire en résumant nos contributions, en discutant de la validation de nos méthodes et en soulignant les différentes pistes de recherches possibles.

Chapitre 2

Analyse, adaptation et synthèse de mouvements d'humanoïdes

2.1 Introduction

La première étape dans l'analyse et la synthèse de mouvements d'humanoïdes consiste à modéliser le personnage à animer. Il convient donc de faire des choix sur les données du corps humain qui sont pertinentes dans le cadre de l'animation d'humanoïdes. Cette modélisation est discutée dans la section 2.2.

Une fois la modélisation du personnage choisie, de nombreuses méthodes de calculs peuvent être appliquées afin d'obtenir le mouvement voulu ou au moins les paramètres du mouvement désirés. La section 2.3 se propose de décrire une partie de ces méthodes.

Nous nous plaçons, dans ce travail de thèse, dans le cadre du traitement et de la production de locomotions humaines. Or, il existe un certain nombre de propriétés spécifiques à ce type de mouvement. Nous présentons, dans la section 2.4, certaines de ces propriétés que nous jugeons pertinentes pour mener à bien notre travail.

2.2 Modélisation d'un humanoïde

Un être humain est beaucoup trop complexe pour être modélisé ou contrôlé dans son intégralité. Le problème consiste alors à représenter, selon l'application visée, ce qui est nécessaire et ce qui ne l'est pas. En effet, bien que le corps humain puisse être divisé en trois couches [CHP89] : le squelette, les muscles et la peau, le squelette lui-même est composé de plus de 206 os [Gra18]. L'introduction de niveaux de détails est alors un passage obligatoire dans la représentation de l'humain. Un enjeu de l'animation d'humanoïde est donc de proposer une représentation simplifiée de la réalité qui préserve néanmoins les caractéristiques essentielles nécessaires à une restitution correcte du mouvement.

2.2.1 Représentation hiérarchique

Les méthodes de synthèse manipulant des personnages utilisent généralement un processus en deux étapes. La première est l'animation qui consiste à créer des mouvements (effets des muscles sur le squelette), et la seconde s'appuie sur cette animation pour ajouter les détails visuels qui améliorent le réalisme de l'enveloppe corporelle tels que les déplacements des muscles et des os sur chaque partie visible de la peau du personnage [LCF00]. Au lieu d'essayer de modéliser l'ensemble des phénomènes du corps humain, déclencheur du mouvement du personnage, on simplifie ces phénomènes, en utilisant les éléments à la fois les plus représentatifs du mouvement et les plus facilement manipulables puisque rigides : les os. Même si cette représentation est simplifiée par rapport à la complexité réelle d'un modèle complet d'animation, elle offre un degré d'erreur suffisamment faible pour fournir une animation en temps réel perçue comme réaliste. Un personnage est donc représenté par sa structure squelettique. Ceci induit que l'analyse et la synthèse de mouvement s'effectue à partir du mouvement de son squelette. Ainsi, un os est remplacé par un modèle simplifié, c'est-à-dire un segment tridimensionnel. La simplification du modèle peut aller jusqu'à la diminution du nombre d'os utilisés pour représenter le personnage, ce qui revient à ne plus s'attacher à la réalité anatomique du personnage, mais plutôt à trouver une représentation qui synthétise leurs actions sur le mouvement.

Pour animer un personnage, on utilise un modèle simplifié du squelette réel, où généralement les liaisons sont parfaites et le nombre d'os limité. Chaque os est relié à un ou plusieurs autres os par des liaisons, on peut représenter cette structure par un modèle hiérarchique, dont chaque nœud, c'est-à-dire chaque liaison, est un élément qui relie deux os. Il suffit de définir un os comme parent de tous les autres, et chaque os aura une position définie en fonction de la position de son os parent. Lors de l'animation, il suffit de connaître la rotation de chaque os par rapport à son parent au cours du temps. Les liaisons qui lient chaque os peuvent être de différents types mécaniques (voir Figure 2.1) en fonction de leurs réalités anatomiques. Les simplifications géométriques sur les articulations permettent de les associer à une position spatiale qui représente le centre de rotation entre deux objets rigides. C'est la raison pour laquelle seuls les trois degrés de liberté de rotation sont utilisés pour déplacer les segments. En effet, si on suppose les tailles des os constantes, ce qui doit être le cas, seule la translation de l'os qui fait office de racine hiérarchique est importante puisqu'elle définit la position générale du personnage dans l'espace de la scène, et les deux types de liaisons possibles sont alors rotule et pivot (seules liaisons avec rotation et sans translation). Toutefois, sur un squelette humain, la zone de contact entre deux os ne permet pas d'avoir un unique centre de rotation puisque celle-ci est surfacique et non parfaite. Plusieurs travaux se sont focalisés sur une représentation plus fidèle d'une partie complexe du squelette telles que la colonne vertébrale [MB91, FMS01], l'épaule [MT00], la main [RG91] ou encore le genou [MPD02]. Ces études restent toutefois proposées pour des éléments séparés du corps humain.

Cette structure hiérarchique simplifiée offre plusieurs avantages. Elle conceptualise le squelette par rapport à ses liaisons, appelées degrés de liberté (ddl) et non plus par

Nom de la liaison	Rotation	Translation	Nombre de DDL	Symbole géométrique
Encastrement	0	0	0	
Pivot	1	0	1	
Glissière	0	1	1	
Glissière hélicoïdale	1	1	1	
Pivot glissant	1	1	2	
Appui plan	1	2	3	
Rotule	3	0	3	
Linéaire rectiligne	2	2	4	
Linéaire annulaire	3	1	4	
Ponctuelle	3	2	5	
Libre	3	3	6	Pas de symbole

FIG. 2.1 – Classification des types de liaisons mécaniques.

rapport à la position des os. Elle permet aussi d'ajouter facilement des informations anatomiques telles que les limites d'angles ou les axes de rotations, tout en restant contrôlable. Cette représentation du squelette (voir Figure 2.2) offre donc une formulation intuitive pour l'animation d'humanoïdes et fait l'objet d'une norme : H-Anim [HA06].

Parmi les autres représentations possible du squelette, Ménardais [Mén03] et Kulpa [Kul05, KMA05] ont proposé une représentation normalisée comportant trois types de chaînes cinématiques (voir Figure 2.3) : des membres (segment de longueurs variables, en rouge), la colonne vertébrale (splines, en bleu) et des segments normalisés (en noir). La force de cette représentation réside dans le fait qu'elle intègre des données angulaires et cartésiennes de manière compacte. Un inconvénient en est forcément le manque de souplesse dans les modélisations et les méthodes de calculs associées aux articulations et à la détermination de leurs configurations.

2.2.2 Ajout de connaissances biomécaniques

Lorsque l'on s'intéresse à l'humain virtuel, l'un des critères décisifs à prendre en considération est le réalisme. En animation d'humains virtuels, les données anthropométriques et les lois biomécaniques participent à cette recherche de réalisme. Les méthodes dynamiques se basent sur la simulation de systèmes poly-articulés ayant des propriétés physiques de masses et d'inerties. Même pour des méthodes fondées sur la modification de trajectoires, ce type d'information permet d'appliquer des contraintes de minimisa-

exemple, être mesurées expérimentalement pour obtenir des données en deux dimensions. Cependant, les repères anatomiques couramment choisis ne correspondent généralement pas aux véritables centres articulaires. Ces données ne sont pas directement applicables à l'animation d'humanoïdes, c'est pourquoi certains modèles se sont orientés sur des représentations anatomiques du squelette [SJC99, Sav02], s'intéressant même à des parties très spécifiques telles que le genou [Gil97, MPD02] et la colonne vertébrale [MB91, FMS01]. Depuis peu, avec l'évolution de techniques comme la tomographie, il est possible d'obtenir ce même type d'information sur des sujets vivants.

Les tables anthropométriques les plus connues sont celles issues des travaux de Zatsiorsky [ZSC90]. Elles donnent, en autres, la masse relative des segments et les rapports entre l'emplacement du centre de gravité et la longueur du segment. L'établissement de cette table est basé sur la technique de radiographie par rayons gamma d'une population de type caucasien de 100 hommes et 15 femmes. Comme dans les précédentes approches, la segmentation du corps s'effectue à partir de repères anatomiques souvent éloignés des centres articulaires. Afin de remédier à ce biais, de nombreuses redéfinitions successives de ces tables ont été proposées avec de nouveaux repères [DeL96]. Hinrichs [Hin90] reprenant par exemple les données de Clauser et coll. [MCY69] et Chandler et coll. [MRY⁺75].

Le Tableau 2.1 présente les rapports de la masse de segments sur la masse totale pour chacun des segments d'un homme selon les données de Winter [Win90] et de Zatsiorsky et coll. [ZSC90].

	Winter [Win90]	Zatsiorsky et coll. [ZSC90]
Bras	0.028	0.0271
Avant-bras	0.016	0.0162
Main	0.006	0.0061
Tête	0.081	0.0694
Thorax	0.216	0.1596
Abdomen	0.139	0.1638
Pelvis	0.142	0.1117
Cuisse	0.100	0.1417
Jambe	0.0465	0.0433
Pied	0.0145	0.0137

TAB. 2.1 – Rapports de masse selon Winter [Win90] et Zatsiorsky [ZSC90].

De manière évidente, nous observons des différences liées en grande partie au fait que la segmentation du corps ne s'effectue pas selon les mêmes repères anatomiques. De plus, les différences observées peuvent aussi s'expliquer par la différence de population participant à l'étude. Mais il est possible d'utiliser ces tables pour travailler avec des squelettes précis, comme c'est le cas dans la norme H-Anim [HA06] ou Mpeg-4 en animation.

2.3 Familles de méthodes de calcul

Le mouvement humain est un phénomène complexe qui est le résultat de nombreux processus mentaux, neuro-musculaire, biomécanique et physiologique qui sont fortement couplés les uns aux autres. Les disciplines expérimentales qui cherchent à percer les secrets du mouvement ont réellement débutées au 19^{ème} siècle avec les travaux de J.E. Marey [Mar94] sur la décomposition du mouvement en une séquence de postures (voir Figure 2.4).

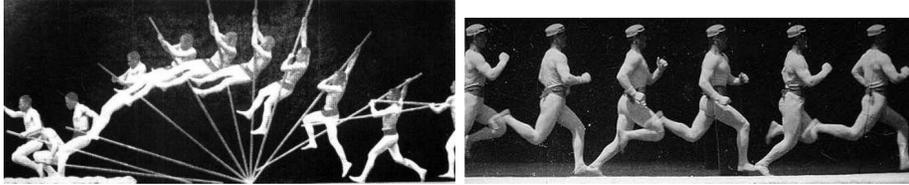


FIG. 2.4 – Études de Marey sur le saut à la perche et sur la course [Mar94].

Dans le cas de l'animation physique d'une articulation, on peut répertorier deux types de modèles : le modèle cinématique et le modèle dynamique. Dans le modèle cinématique, seules les positions, les vitesses et les accélérations de l'articulation sont considérées, sans porter intérêt à la masse ou au fonctionnement interne de l'articulation ou de ses composants. Il décrit donc les mouvements et les possibilités de mouvement. Il existe un modèle appelé statique qui est adapté à des mouvements lents où l'on considère la position d'équilibre des forces internes et externes agissant sur l'articulation. On utilise des modèles quasi-statiques, c'est-à-dire des modèles de résolution successive de mouvements statiques, pour simuler les effets du mouvement. Le modèle dynamique incorpore à la fois le modèle cinématique et le modèle statique où les accélérations ne sont pas négligées, pour permettre de prendre en compte les forces faisant agir l'articulation et la production du mouvement.

2.3.1 Méthodes de cinématique directe et inverse

La méthode de cinématique directe consiste à décrire l'évolution du mouvement de la géométrie d'un système. Dans notre cas, le mouvement s'applique à un personnage formé de corps articulés par des liaisons constituant un ensemble hiérarchique. Son mouvement est principalement défini par des rotations, car la longueur de chaque segment est définie et fixe. Les angles de rotations permettent de trouver la position locale des éléments successifs, en parcourant l'arbre hiérarchique et en accumulant les rotations. Pour animer un modèle, il suffit donc de décrire la manière dont doivent évoluer les différents angles. Il existe de nombreuses manières efficaces et numériquement correctes pour définir ces angles. Sous forme d'équation, cela revient à résoudre :

$$X = f(\Theta) \quad (2.1)$$

avec X la position terminale d'un élément du squelette et $\Theta = (\Theta_1, \Theta_2, \Theta_3, \Theta_4, \dots, \Theta_n)$ le vecteur représentant les angles articulaires. La fonction f est appelée fonction de

cinématique directe. Cette fonction est la résultante du cumul de toutes les transformations géométriques ayant permis de passer du repère global du monde au repère local de chaque segment.

Cette méthode est simple à mettre en œuvre et permet de manipuler de nombreux personnages en temps réel, offrant ainsi une visualisation du mouvement très intuitive. Malheureusement sa manipulation devient très complexe lorsque les chaînes hiérarchiques du squelette deviennent trop longues. En effet, la modification de l'angle d'une des liaisons modifie la position de tous les éléments suivants dans la hiérarchie.

En animation, le principe inverse est beaucoup plus souvent utilisé [BT92]. En effet, contrôler la position terminale d'une chaîne, sans avoir à spécifier tous les angles intermédiaires, est très utile pour imposer une contrainte cinématique. La méthode utilisée alors est la cinématique inverse. Cette méthode, issue de la robotique, consiste, à partir d'une contrainte cinématique imposée, à calculer le meilleur mouvement possible des angles pour y parvenir. Cette méthode est souvent utilisée pour contrôler certaines parties du squelette, comme par exemple les mains ou les pieds. Ainsi pour bouger le bras ou la jambe, il suffit de désigner la position dans laquelle la main ou le pied devra se trouver. D'un point de vue mathématique cela revient à inverser l'équation de cinématique directe, c'est-à-dire trouver la fonction f^{-1} vérifiant l'équation :

$$\Theta = f^{-1}(X) \quad (2.2)$$

Le problème est que cette fonction n'est pas bijective et qu'il existe bien souvent un grand nombre de solutions répondant au problème. Pour l'illustrer, prenons le cas d'une jambe composée de deux segments dont on impose la position des extrémités : la cheville et la hanche. Il existe alors une infinité de solutions qui conduisent à placer le genou sur un cercle et qui respectent la cinématique des liaisons. On dit alors que le système est redondant. Ce cas de figure arrive obligatoirement lorsque le nombre de degrés de liberté est supérieur au nombre de contraintes. Ainsi, dans l'exemple de la jambe, nous avons 3 degrés de liberté à la hanche (liaison rotule) et 1 (liaison pivot) au moins au niveau du genou. Si on contraint la cheville en position, on définit 3 contraintes (une par dimension). Il reste donc $4 - 3 = 1$ ddl non contraint qui conduit à un espace de solution à une dimension qui implique effectivement que le genou se situe sur un cercle décrit par la rotation autour de l'axe reliant la hanche au point qui définit la position de la cheville (voir Figure 2.5(a)) [KB82]. Pour des chaînes cinématiques plus longues, par exemple si on décide de contraindre la position du bout du pied et non plus de la cheville (qui possède au moins 1 ddl), l'espace des solutions est alors de dimension $5 - 3 = 2$ (voir Figure 2.5(b)). Choisir une solution est alors beaucoup plus complexe.

Le but de la cinématique inverse est donc de choisir l'ensemble des angles Θ qui permet de respecter les contraintes placées sur les effecteurs. Plusieurs techniques peuvent alors être appliquées pour résoudre cette difficulté [BB01].

Méthode analytique

Lorsque la structure articulée est simple, les méthodes analytiques représentent la solution idéale. En effet, elles offrent instantanément la solution au problème de cinématique inverse. Ces méthodes sont généralement appliquées sur des chaînes articulées com-

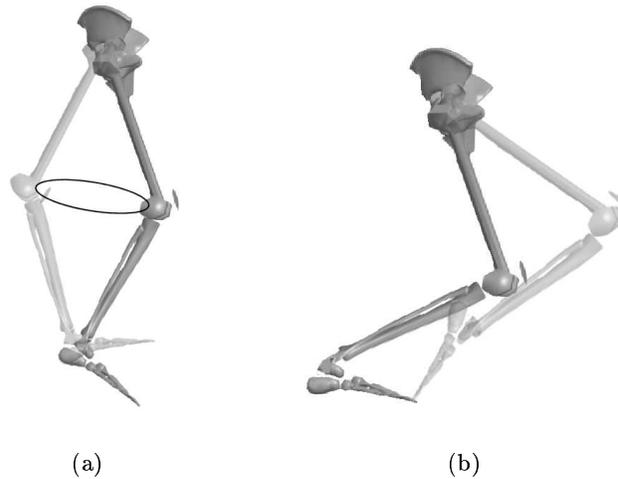


FIG. 2.5 – Cinématique inverse sur des chaînes à deux (a) et trois (b) segments dans un espace à trois dimensions. Dans le cas (a) l'articulation du genou a une infinité de solutions placées sur un cercle. Dans le cas (b), l'espace de solutions n'est déjà plus intuitif.

posées de deux segments tels que le bras ou la jambe [TB96, Wan99, TGB00, SLSG01]. Elles peuvent aussi servir à contraindre un personnage à toucher le sol [Mén03]. Le contact des pieds, dans ce cas, est assuré par la définition des empreintes à respecter. La solution analytique consiste alors à trouver la hauteur correcte du centre de gravité (CdG) du personnage en tenant compte deux critères : les pieds doivent toucher le sol et la position du CdG doit être la plus proche possible de celle de la posture à adapter. Enfin les jambes sont à leur tour adaptées de manière analytique.

Cependant, ces méthodes analytiques sont difficiles à mettre en place pour l'ensemble du corps humain puisque sa structure articulée est très complexe, entre 30 et 40 degrés de liberté en général. Il faut donc faire appel à des méthodes numériques ou à des méthodes combinant analytique et numérique [TGB00].

Méthode de linéarisation locale

Afin de résoudre l'équation 2.2 de la cinématique inverse, il faut inverser la fonction f . Cette fonction f est complexe et clairement non linéaire. Une solution consiste à linéariser localement le problème autour de la configuration courante [Whi69]. Nous pouvons évaluer la petite variation des angles $\Delta\Theta$ en fonction de la variation des positions ΔX des effecteurs terminaux à l'aide de l'équation suivante :

$$\Delta X = J\Delta\Theta \quad (2.3)$$

avec J la matrice jacobienne carrée régulière du système. Pour trouver $\Delta\Theta$, on peut exprimer l'équation de cette manière :

$$\Delta\Theta = J^{-1}\Delta X \quad (2.4)$$

Le problème est que J est souvent non inversible, à cause des dimensions différentes de X et de Θ (voir l'exemple cité précédemment). En effet, pour une configuration des effecteurs finaux, nous venons de voir qu'il peut exister une infinité de configurations angulaires la vérifiant.

C'est alors la pseudo inverse de Moore-Penrose [Pen55] J^+ qui est utilisée :

$$\Delta\Theta = J^+\Delta X \quad \text{avec} \quad J^+ = \begin{cases} (J^t J)^{-1} J^t & \text{si } M > N \\ J^t (J J^t)^{-1} & \text{si } M < N \end{cases} \quad (2.5)$$

où N est le nombre de ddl Θ et M est le nombre de paramètres X de l'effecteur.

Cette pseudo-inverse est optimale, c'est-à-dire que les solutions possèdent une norme euclidienne minimale, pour les systèmes sous-contraints. Pour ces derniers, Liegeois [Lie77] a proposé une forme plus générique qui permet de lever la redondance des solutions :

$$\Delta\Theta = J^+\Delta X + \alpha(I - J^+J)\nabla z \quad (2.6)$$

avec I la matrice identité, α une constante de pénalité et ∇z le gradient de la fonction objectif à minimiser.

Cette fonction z permet d'appliquer des lois de recherche dans l'espace de solutions fourni par l'équation 2.5. Ces lois sont appelées "tâches secondaires". De nombreuses méthodes de calculs sont ainsi utilisées pour résoudre le problème de redondance du système comme la minimisation d'énergie [NMB04], la minimisation d'écart de posture [CPK99, CLS00], l'évitement de collision [Neb00], la prise en compte d'angles limites aux articulations [GM85], le contrôle du centre de masse [LB04], ou encore le contrôle du confort de fatigue [RBM02]. Nous pouvons évaluer les différents angles respectant la position à atteindre de l'effecteur terminal, tout en minimisant la violation des contraintes ainsi introduites.

2.3.2 Méthodes de cinétique et de contrôle du centre de masse

En animation, Phillips [PB91] a montré le premier l'importance de contrôler le centre de masse (CdM) global pour gérer les notions d'équilibre en position quasi-statique c'est-à-dire pour des mouvements lents où les accélérations sont négligeables. Ce contrôle permet de gérer des postures complexes tout en vérifiant que la projection du centre de masse sur le sol se trouve bien dans une zone délimitée par les pieds : le polygone de sustentation. Ce dernier définit, dans le plan horizontal, le déplacement maximal du CdM qui garantit l'équilibre en quasi-statique. Depuis 1994, ce contrôle du CdM est aussi appelé cinétique inverse [BMT94, Mas96]. La Figure 2.6 montre la conservation du CdM du personnage le long d'un axe vertical au-dessus des pieds. La cinétique inverse est généralement résolue avec une formulation de cinématique inverse avec gestion des priorités [BST97, BB00].

Dans une autre approche, au lieu d'optimiser un ensemble de paramètres, un principe de contrôle physique consiste à filtrer le mouvement pour prendre en compte un ensemble de contraintes dynamiques. Le plus courant concerne le respect de l'équilibre qui peut être formalisé comme le maintien d'un point virtuel *Zero Moment Point* (ZMP) dans le polygone de sustentation (voir Figure 2.7).

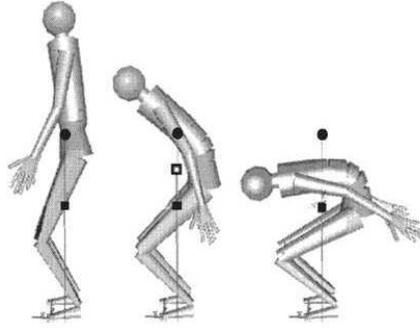


FIG. 2.6 – Utilisation de la cinétique inverse pour contrôler la position du CdM sur une même ligne verticale au-dessus des pieds [BST97]. Elle permet de conserver l'équilibre en position quasi-statique.

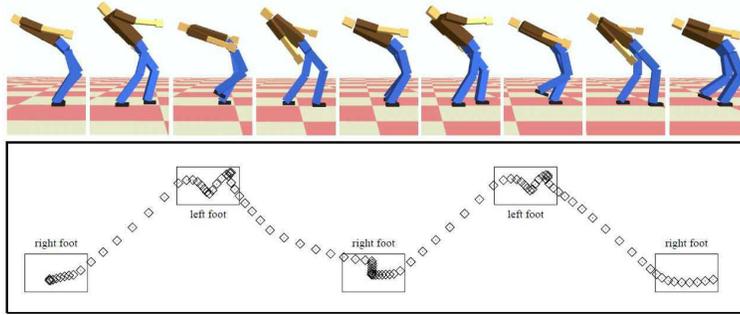


FIG. 2.7 – Maintien de l'équilibre en conservant le ZMP dans le polygone de sustentation [TSK00].

Le ZMP est défini comme le point où la résultante des moments linéaires des membres est nulle [Vuk90] :

$$\sum_s m_s (\vec{r}_s - \vec{Z}) \wedge \vec{r}'_s = \sum_s m_s (\vec{r}_s - \vec{Z}) \wedge \vec{g} \quad (2.7)$$

où \vec{g} est l'accélération due à la gravité, \vec{Z} est le ZMP, m_s et \vec{r}_s sont respectivement la masse et la position du CdM du segment s . Il est ainsi possible de définir une contrainte d'égalité à vérifier à chaque image. Pendant les phases aériennes, le CdM doit suivre une trajectoire parabolique d'accélération égale à g et le moment cinétique doit rester constant. Ces deux contraintes sont ajoutées à un processus itératif exécutant séquentiellement une résolution aux instants des contraintes spatio-temporelles et un filtrage pour assurer la continuité. Ces méthodes ont largement été utilisées en robotique pour simuler la locomotion de robots [SB04].

La méthode a été étendue pour ne plus avoir ce type de processus itératif mais plutôt à chercher des solutions optimales à chaque pas de temps. On parle alors de filtre dynamique [TSK02, YN03]. Ce genre de méthode peut également être utilisée conjointement à des bases de données de mouvement pour rechercher des postures crédibles

[GMHP04]. D'autres approches proposent d'enrichir ces modèles en utilisant des techniques d'apprentissage pour représenter la physique [GT95, LHP05] ou pour identifier des actions [AFO02].

2.3.3 Méthodes de dynamique directe et inverse

Les modèles dynamiques permettent d'apporter un réalisme dans les animations par l'utilisation de lois physiques pour la génération de mouvement [VDO99]. Ils permettent de produire des trajectoires pour un nombre quelconques d'acteurs ou de situations grâce à la généralité des équations du mouvement. En effet, à partir du formalisme de Lagrange ou de celui de Newton, il est possible de dériver un modèle mécanique de tout système poly-articulé [Arn89, Dum90]. Ces modèles sont capables de prendre les forces et les couples agissant à tous les niveaux du système pour calculer la configuration angulaire au pas de temps suivant via des intégrateurs numériques optimisés. Ces techniques ont largement été employées pour simuler des systèmes inertes. Pour des systèmes utilisant des commandes, il est alors nécessaire de définir des contrôleurs qui calculent les forces et les couples nécessaires pour résoudre une tâche donnée. Le contrôle du mouvement n'est ainsi plus directement géré par l'animateur mais par les lois physiques, sa gestion est donc beaucoup moins intuitive que par des méthodes basées sur la cinématique.

En général, un moteur d'animation en dynamique directe a pour support un système d'équations différentielles du second ordre de la forme :

$$[A](\vec{q})\vec{\ddot{q}} + \vec{B}(\vec{q}, \vec{\dot{q}}) = \vec{E} \quad (2.8)$$

où \vec{q} , $\vec{\dot{q}}$ et $\vec{\ddot{q}}$ représentent les paramètres de l'animation et leur dérivées première et seconde, $[A]$ la matrice des masses généralisées, \vec{E} le vecteur des efforts imposés au système et $\vec{B}(\vec{q}, \vec{\dot{q}})$ les autres termes dynamiques (forces d'inertie, de Coriolis).

Un tel système est décrit par les objets de la scène affectés de leurs données mécaniques (masse, centre de gravité, matrice d'inertie), des forces appliquées aux objets et éventuellement des contraintes permettant de lier les objets entre eux ou de limiter l'évolution des paramètres. Il est de plus nécessaire de donner l'état initial du système.

Deux méthodes principales apparaissent dans la majorité des travaux, ce sont les deux approches classiques de la dynamique. Il s'agit de l'approche basée sur les relations fondamentales de la dynamique, communément appelées équations de "Principe Fondamental de la Dynamique" (PFD) et de l'approche basée sur une étude énergétique et les équations de Lagrange.

Principe Fondamental de la Dynamique

Le système d'équation est constitué de deux entités. La première exprime le PFD pour la partie correspondant à la translation de l'objet et la seconde pour la partie correspondant à la rotation. Les équations s'écrivent comme suit :

$$\begin{cases} \sum_s \overrightarrow{Forces}_s = m_s \cdot \vec{a}_{CG_s} \\ \sum_s \overrightarrow{Moments}_s = [I]_{CG_s} \cdot \vec{\omega}_s \end{cases} \quad (2.9)$$

où m_s est la masse du segment s de centre de gravité CG_s et d'inertie $[I]_{CG_s}$, \vec{a}_{CG_s} est l'accélération linéaire au centre de gravité du segment et $\vec{\omega}_s$ son accélération angulaire.

Dans le cas de chaînes cinématiques ouvertes, cette approche permet de créer et résoudre les équations efficacement. Cette résolution est souvent effectuée en mettant en œuvre un algorithme de Newton-Euler récursif.

Travaux virtuels et formalisme Lagrangien

Ce formalisme est basé sur la conservation énergétique du système au cours du mouvement et se calcule dans l'espace des paramètres. Les équations de Lagrange créent une relation entre les apports énergétiques des efforts extérieurs E_i au cours du mouvements et l'énergie cinétique K du système :

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial K}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial K}{\partial q_i} = E_i \text{ avec } i = 1 \text{ à } n \quad (2.10)$$

avec q_i représentant le $i^{\text{ème}}$ paramètre de positionnement du système.

L'intérêt principal de ce formalisme est de pouvoir intégrer naturellement toutes les interactions entre objets. En effet, les contraintes sont gérées avec la méthode de multiplicateurs de Lagrange et les boucles cinématiques ne sont pas traitées comme des cas particuliers.

Par exemple, Rémion [Rém00] a choisi de développer un moteur basé sur les travaux virtuels avec les équations de Lagrange permettant d'animer directement les coordonnées généralisées, expression naturelle des paramètres de la modélisation. Les articulations peuvent alors avoir un nombre de degrés de liberté (ddl) quelconque, ceux-ci pouvant être simples (rotation, translation), ou complexes comme des "vissages". Cet aspect généraliste du moteur contrebalance les temps de calculs plus importants obtenus par rapport à une méthode basée sur le formalisme de Newton-Euler.

Formulation des équations du mouvement

La majorité des travaux exprime les équations du mouvement sous forme numérique, naturelle en informatique. Cette forme implique des approximations numériques lors du calcul des membres des équations du mouvement qui font intervenir des dérivées. Il est alors possible de les exprimer sous forme symbolique [Arn89, Dum90]. Ce mode de représentation est la traduction exacte de la représentation mathématique. Il nécessite des outils de gestion de graphe lors de la création des équations. De plus, les équations n'ont que très rarement une solution analytique (formelle), elles nécessitent un passage au numérique pour la résolution du système. L'intérêt majeur est d'avoir une expression formellement exacte des équations du mouvement qui augmente la précision. Cependant les outils nécessaires à la manipulation symbolique engendrent des développements conséquents et des taux de stockage importants. Pour des systèmes utilisant des commandes, il est nécessaire de définir des contrôleurs [Lec94] qui calculent les forces et couples nécessaires pour résoudre une tâche donnée.

Afin d'amener le système à une configuration donnée (une posture imposée par exemple), une solution consiste à utiliser un contrôleur de type proportionnel-dérivé :

$$\tau = K_p(\Theta - \Theta_d) + K_d(\dot{\Theta} - \dot{\Theta}_d) \quad (2.11)$$

où Θ est l'état courant du système (la posture courante), Θ_d est la posture désirée, τ est le vecteur de couples à appliquer au système mécanique, K_p et K_d sont les gains du contrôleur. Ce type d'approche est couramment employé pour contrôler le mouvement humain [Hod96, Hod98, FP03, HP97] et entre autres, a été utilisée pour piloter un bras humain [MNA⁺99]. Cependant, il est très difficile de trouver des valeurs de gains génériques qui satisfassent toutes les situations possibles. Si on cherche à contrôler le bras en imposant une position à l'un des points du squelette, on peut aussi utiliser des multiplicateurs de Lagrange liés à cette contrainte qui représentent la force (ou le couple) à appliquer pour respecter la contrainte. Le problème consiste à trouver les bons paramètres pour produire un mouvement naturel. Une fois qu'un contrôleur a été réglé, des animations réalistes peuvent être produites, comme des sauts [HWBO95] ou des mouvements de personnages non humains [LVF00]. Malheureusement, ce type de contrôleurs n'offrent généralement pas un contrôle suffisant pour des animations très expressives. C'est pourquoi d'autres approches [TA06] ont proposées d'enrichir les modèles par des données telles que l'activation musculaire et le pilotage par données expérimentales.

Une alternative à ces approches calculatoires est d'effectuer un apprentissage du contrôleur soit à partir d'une base de données de mouvements, soit par renforcement. Généralement, la méthode revient à utiliser un réseau de neurones [MGJ01]. Cet apprentissage peut servir à calculer automatiquement les préconditions et postconditions nécessaires à l'application de contrôleurs dédiés à des tâches limités, comme s'asseoir ou se lever [FVT01].

2.3.4 Utilisation de mouvements capturés

Le développement des systèmes de capture de mouvement a énormément influencé les recherches récentes en animation d'humanoïdes. En effet, un grand nombre de travaux partent de l'hypothèse que les trajectoires capturées contiennent de manière intrinsèque toutes les informations nécessaires. D'ailleurs, Johansson [Joh73] montre qu'il est très facile de reconnaître la démarche d'une personne uniquement avec quelques points animés. Ceci montre bien que, sans comprendre précisément les processus mis en jeu, il est possible d'utiliser la capture de mouvement pour rendre les gestes d'humains virtuels crédibles.

La capture de mouvements présente un intérêt indéniable : le réalisme des animations obtenues est bien supérieur à celui obtenu avec les méthodes d'animation classiques comme les méthodes cinématiques et dynamiques. Cependant cette technique présente un défaut qui est la contrepartie directe de sa force : le mouvement capturé est figé dans sa spécificité, et si on tente de l'adapter à une morphologie différente, ou le déformer pour répondre à un objectif donné, le réalisme du mouvement est altéré de manière significative. Différentes méthodes répondent partiellement à cette lacune et tentent de se servir du mouvement capturé comme d'une base modifiable pour générer des animations particulières. Mais, à partir d'un mouvement donné, le spectre des mouvements que l'on peut obtenir via ces méthodes est relativement limité. Par exemple, modifier le style d'un mouvement nécessite des connaissances sur la nature même du mouvement

dont on ne dispose pas. Il est donc nécessaire d'être prudent lorsque de telles méthodes sont utilisées, par exemple en utilisant des adaptations relativement petites [GL98] ou en effectuant des modifications dans une classe de mouvement bien définie comme le saut [KG04] ou la marche [RCB98]. Lorsque cela n'est pas possible, un certain nombre de méthodes d'adaptation sont applicables.

2.3.4.1 Adaptation à de nouveaux personnages

Cette technique, appelée *retargeting* [Gle98], consiste à adapter le mouvement d'une personne à une autre personne aux proportions différentes. En effet, lorsque l'on effectue une capture, on peut obtenir les courbes d'évolutions des différents angles des articulations du squelette. On peut utiliser ces données pour animer un autre squelette. Mais on s'aperçoit que comme les os du squelette sont de tailles différents, les angles ne provoquent plus le même déplacement des éléments dans l'espace (voir Figure 2.8).

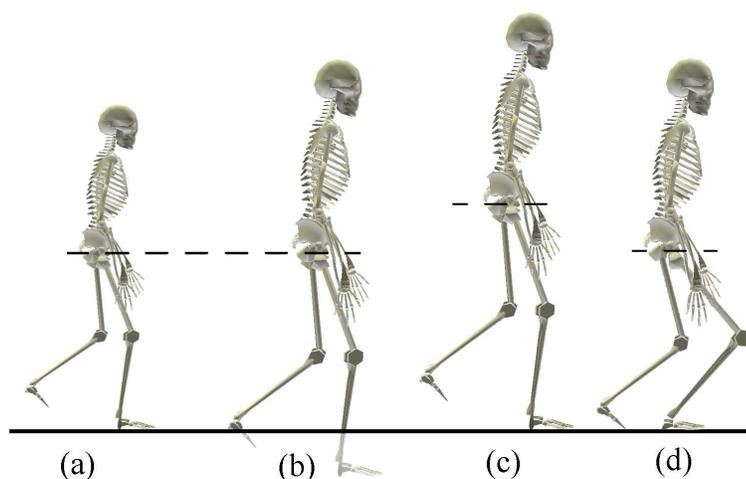


FIG. 2.8 – Problème d'adaptation à des morphologies différentes. Les mêmes angles sont appliqués sur les deux personnages des parties (a) et (b). Si on considère que la racine hiérarchique du squelette est bien au centre du bassin, les deux pieds pénètrent dans le sol. Il existe alors deux manières de résoudre le problème : remonter tout le squelette jusqu'à respecter les contraintes au sol (c), ou bien modifier les angles à la hanche, au genou et à la cheville pour davantage plier les jambes (d).

Ce phénomène est d'autant plus gênant qu'il peut subvenir dès la première étape d'utilisation de la capture du mouvement, lorsque la personne réelle qui effectue cette capture a un gabarit différent de l'humain virtuel. On peut l'observer facilement par des pieds glissant sur le sol ou des inter-pénétrations, et de façon évidente lorsque le personnage interagit avec un autre personnage ou un élément quelconque de l'environnement.

Le problème d'adaptation de mouvements à un nouveau squelette peut donc se ramener à la vérification de contraintes spatio-temporelles. Gleicher et coll. [Gle98]

résolvent ces contraintes de manière itérative en utilisant des cartes de déplacement. La Figure 2.9 montre le résultat de l'adaptation morphologique obtenue avec cette méthode.

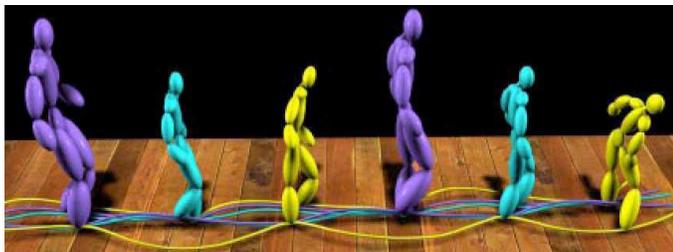


FIG. 2.9 – Adaptation d'un mouvement de marche à différents squelettes [Gle98].

Komura et coll. [KSK00, KS01] adaptent également le mouvement à partir de contraintes spatio-temporelles. Le squelette est toutefois ici enrichi par la prise en compte des forces liées aux muscles. Cette modélisation plus précise permet de quantifier et d'adapter certains critères physiologiques.

Monzani et coll. [MBBT00] utilisent un squelette intermédiaire pour effectuer l'adaptation des trajectoires sur une nouvelle morphologie. Dans un premier temps, l'utilisateur spécifie les correspondances entre les articulations du sujet acquis (*Performer Skeleton*) et celles du squelette final (*End User Skeleton*). La Figure 2.10(a) montre un exemple de correspondance entre plusieurs articulations du bras et de l'épaule. Dans un deuxième temps, les positions sont mises en correspondance afin de transposer au mieux les orientations du mouvement initial sur le nouveau squelette (Figure 2.10(b)). Au final, une série de contraintes cinématiques est spécifiée afin de conserver certaines caractéristiques du mouvement. La résolution de ces contraintes se fait par l'utilisation de fonctions de déplacement contrôlées par cinématique inverse.

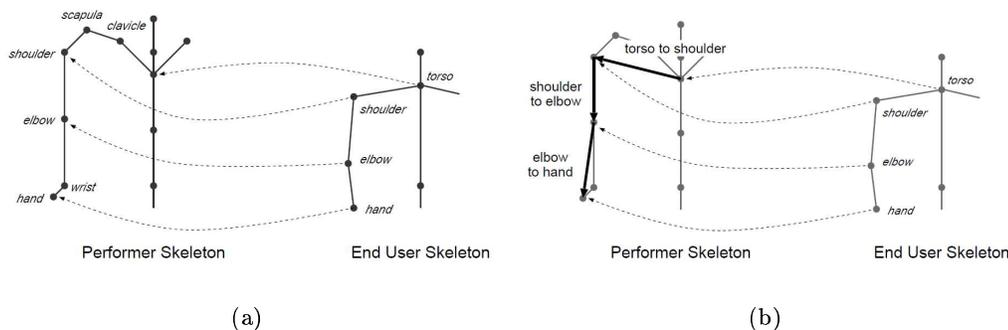


FIG. 2.10 – Utilisation d'un squelette intermédiaire pour l'adaptation morphologique [MBBT00].

Lee et Shin [LS99] proposent de décomposer les trajectoires articulaires en splines hiérarchiques (voir Figure 2.11(a)). Elles permettent de modifier localement le mouvement et de propager la déformation sur les postures voisines de manière continue. La

décomposition hiérarchique permet en outre de travailler localement ou globalement suivant le niveau choisi (modifications des basses ou hautes fréquences). La résolution des contraintes est effectuée à l'aide d'une cinématique inverse numérique combinée avec des résolutions analytiques pour les membres. La Figure 2.11(b) montre une adaptation temps réel d'un mouvement de marche sur une morphologie qui change dynamiquement.

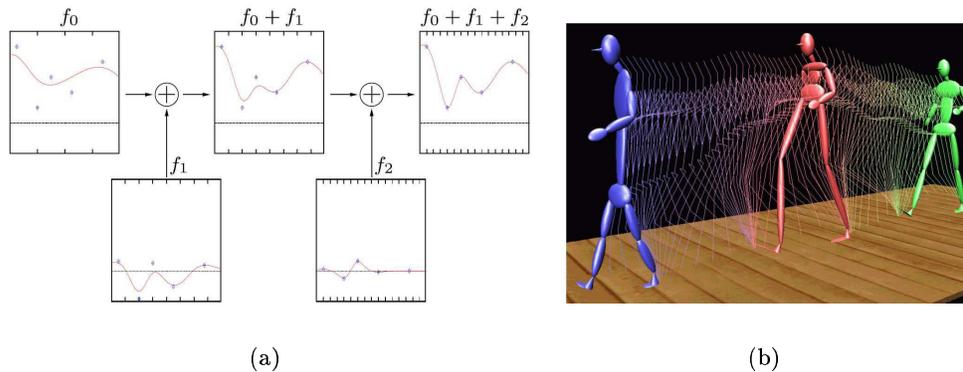


FIG. 2.11 – Utilisation de splines hiérarchiques (a) pour effectuer une adaptation morphologique (b) en temps réel [LS99].

2.3.4.2 Modification de mouvement

Plusieurs auteurs ont cherchés à appliquer les techniques d'optimisation pour résoudre les contraintes spatio-temporelles liées aux adaptations de mouvement [WK88]. Dans ce cas, le problème revient à chercher une succession de postures $x(t)$ qui minimise une fonction de coût. L'optimisation des contraintes spatio-temporelles offre une méthode générale pour déformer un mouvement d'origine. Plusieurs facteurs limitent néanmoins le domaine d'utilisation de cette méthode tels que le grand nombre d'équations de contraintes, la limitation sur l'échantillonnage et sur la complexité articulaire ou l'impossibilité du traitement temps réel.

Pour éviter les coûts et les inconvénients de l'optimisation, Bruderlin et coll. [BW95] ont proposé une technique qui permet de modifier un mouvement de référence m , décrivant fréquemment les trajectoires articulaires, afin d'obtenir un nouveau mouvement adapté m' . Cette fonction de déformation, appelée carte de déplacement (*displacement map*) permet d'obtenir la trajectoire $m'(t)$ déformée en conservant les caractéristiques (hautes fréquences) du mouvement d'origine $m(t)$:

$$m'(t) = m(t) + \Delta(t) \quad (2.12)$$

La fonction Δ représente la variation à ajouter aux trajectoires articulaires d'origine afin d'obtenir le mouvement m' souhaité. Elle se calcule en filtrant la série de positions-clés $(m'(t_i) - m(t_i), t_i)$. Dès lors, l'adaptation du mouvement peut être réalisée en utilisant des contraintes spatio-temporelles uniquement aux instants où elles sont actives

[Gle97, GL98, Gle01a, Gle01b]. Des techniques de type cinématique inverse sont alors utilisées pour les résoudre. Même s'il faut parfois un grand nombre d'itérations, la complexité de cette méthode se base sur le nombre de contraintes uniquement, contrairement aux méthodes d'optimisation dont la complexité est liée au paramétrage de toutes les trajectoires. Toutefois, le temps de calcul des cartes de déplacement dépend fortement de la méthode de cinématique inverse employée car elle est exécutée un grand nombre de fois. Le Callenec et Boulic [LB04] ont utilisé cette technique pour l'adaptation interactive du mouvement d'un personnage.

En plus d'un ajout de trajectoire, Witkin et Popović [WP95] ont proposé une méthode appelée *motion warping* qui permet de modifier un mouvement de référence m afin d'obtenir un nouveau mouvement adapté m' . Cette adaptation est effectuée en spécifiant une série de contraintes cinématiques sur les trajectoires des paramètres appelées courbes de mouvement (*motion curves*). Dans un premier temps, toutes les postures $m'(t_i)$ sont déterminées de manière à vérifier les contraintes et à se rapprocher au mieux de la posture d'origine $m(t_i)$. Le mouvement m' est alors constitué de ces postures clés $(m'(t_i) - m(t_i), t_i)$. La relation entre les mouvements m et m' est alors définie par :

$$m'(t) = a(t)m(t) + b(t) \quad (2.13)$$

où $a(t)$ et $b(t)$ sont les valeurs à l'instant t de deux fonctions caractérisant la déformation (une mise à l'échelle et une translation). En résolvant la relation aux instants t_i , on obtient deux ensembles de positions clés $(a(t_i), t_i)$ et $(b(t_i), t_i)$. Par interpolation (linéaire, cubique, B-Splines cubiques, wavelet B-Splines), il est possible de reconstruire les deux fonctions et par conséquent le mouvement final déformé m' . Cette méthode est toutefois plus difficile à contrôler car il faut trouver le paramètre $a(t)$ à chaque pas de temps.

Pour réduire le temps de calcul, il est nécessaire d'avoir recours à des modèles simplifiés de squelette pour effectuer l'optimisation du système mécanique [PW99, LP02].

2.3.4.3 Combinaison de mouvements

À partir de données génériques, calculer de nouveaux mouvements revient à trouver les opérateurs capables d'adapter ces données à de nouvelles conditions. Toutefois, vu la très grande variété de mouvements naturels possibles, il est très difficile de proposer des méthodes capables de reproduire tous les styles et toutes les situations. De plus, les connaissances génériques se limitent à un ensemble très restreint de mouvements (généralement la locomotion) et il est très difficile d'extrapoler ces méthodes pour générer d'autres mouvements complexes.

Une alternative consiste à supposer qu'un mouvement peut être représenté comme une combinaison de plusieurs autres. Deux grandes approches sont proposées dans la littérature, les graphes de mouvements et le mélange de mouvements.

Graphes de mouvements

Avec la multiplication des systèmes de capture du mouvement, il existe maintenant un grand nombre de bases de données de gestes humains. Il faut alors organiser cette base de données pour l'utiliser au mieux. Les contraintes sont de pouvoir gérer un maximum de situations différentes possibles sans pour autant devoir faire une acquisition pour chacune d'entre elles.

La solution la plus couramment utilisée consiste à proposer un graphe de mouvements (*motion graph*) dans lequel les nœuds sont des configurations du squelette (intégrant posture et parfois vitesse) et les arcs des transitions possibles entre deux configurations [KGP02, KG03]. Ainsi, pour un unique mouvement, toutes les postures sont potentiellement des nœuds et les transitions sont liées à la séquentialité dans le mouvement. Toutefois, ces transitions ne sont pas limitées à cette séquentialité mais à une notion de distance entre deux configurations. Par exemple, plusieurs auteurs ont proposés d'utiliser la similarité entre les angles et les vitesses articulaires des postures [LCR⁺02, WB03], ou bien une métrique basée sur le mouvement des segments corporels pour sélectionner le meilleur instant de transition [PW99, Mén03]. Arikan et coll. [AF02] ont ajoutés l'information de vitesse et d'accélération du torse dans son repère local. Enfin, Brand et Hertzmann [BH00] ont, à partir de modèles de Markov cachés, estimés les probabilités liées aux états de transitions sur des mouvements possédant chacun leur style (différents gestes de danse).

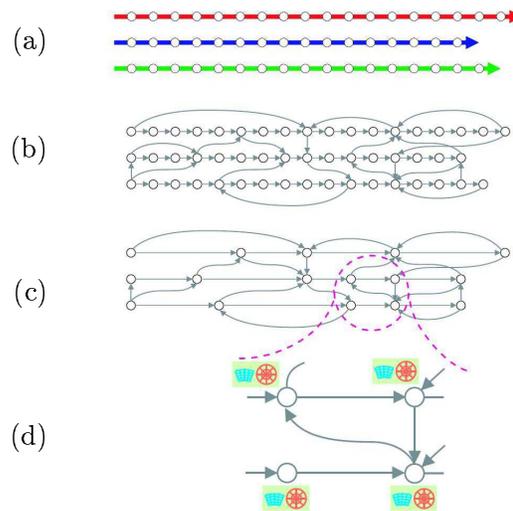


FIG. 2.12 – Graphe de mouvements [LL04]. (a) Les trois mouvements composés d'une succession de postures. (b) Les transitions trouvées entre les différentes postures des mouvements. (c) Les nœuds qui n'ont qu'une seule transition de sortie sont regroupés. (d) Une grille est ajoutée au nœud afin de modifier le choix des transitions en fonction de la position de l'objectif (une balle à atteindre).

Grâce au calcul de distance entre deux configurations, il est possible de déterminer toutes les transitions possibles dans le graphe de mouvements [KGP02] (Schödl et coll. [SSSE00] appliquent la même technique pour les images vidéo). Ce pré-calcul est assez

long et s'effectue hors-ligne. Ensuite, produire un mouvement dans ce graphe revient à trouver un chemin menant d'une configuration courante à une configuration souhaitée (voir Figure 2.12b). Lee et coll. [LL04] proposent d'aller plus loin en regroupant les nœuds qui font partie de la même séquence de mouvements, c'est-à-dire ceux qui se suivent obligatoirement (une seule transition en sortie). Le graphe est alors simplifié et les nœuds restants sont des postures clés du mouvement (voir Figure 2.12c). Afin d'avoir un contrôle de plus haut niveau, chaque nœud du graphe est associé à des informations qui permettent d'influencer le choix des transitions. Par exemple, afin de pouvoir contrôler un boxeur qui tente d'atteindre une balle déplacée interactivement par l'utilisateur, chaque nœud du graphe contient une grille pour positionner la balle par rapport au personnage (voir Figure 2.12d). Cette technique a également été illustrée sur la locomotion humaine sur terrain très complexe impliquant des transitions entre marches, courses, sauts et pas chassés à partir d'empreintes au sol [SM01]. Kwon et Shin [KS05] utilisent quant à eux une labellisation des nœuds en exploitant le déplacement du centre de masse de l'humanoïde.

Ces méthodes sont très intéressantes pour l'animation interactive mais nécessitent une base de données très importante. En effet, avec ces méthodes, il n'est pas possible de recalculer de nouvelles configurations. C'est pourquoi, pour couvrir un maximum de configurations différentes, il est nécessaire d'avoir une base de données très volumineuse. À l'inverse, on peut envisager de disposer d'une base de données restreinte et chercher une combinaison de postures, à chaque pas de temps, qui résoud le problème posé.

Mélange de mouvements

Si on a un mouvement de marche et un mouvement de saut qui ont été capturés séparément, on peut vouloir les enchaîner. Pour cela, il faut mettre en relation la fin du mouvement de marche et le début de celui de saut. On utilise alors des techniques de mélange de mouvements (*motion blending*). Naturellement, si on fait une simple pondération progressive entre les deux mouvements, nous obtenons, presque à coup sur, quelques défauts dans l'animation, comme le non respect de la contrainte du pied sur le sol. Il faut donc, pour effectuer ce mélange, que les mouvements répondent à un certain nombre de contraintes. L'une des plus importantes concerne la synchronisation des mouvements à mélanger afin d'assurer une cohérence temporelle. Ainsi, il n'est pas possible de mélanger un saut à cloche-pied droit et un saut à cloche-pied gauche.

Cette synchronisation entre deux mouvements est principalement assurée par des événements identifiés dans chacun des deux mouvements. Par exemple, dans une locomotion, les événements de contact du pied au sol et de décollage du pied peuvent être utilisés. Intuitivement, après un contact du pied sur le sol, on peut enchaîner raisonnablement un mouvement qui se base sur un appui de ce même pied.

Pour mélanger deux mouvements compatibles (deux locomotions par exemple), il faut donc synchroniser ces événements. Le plus évident est de faire correspondre tout d'abord les durées des deux mouvements. Dans cette durée normalisée, il faut ensuite mettre en correspondance les instants où ont lieu les mêmes événements dans les deux mouvements. Cette opération est appelée déformation dynamique du temps (*Dynamic*

Time Warping). Cette technique présentée par Bruderlin et coll. [BW95] pour le domaine de l'animation de personnages permet de compresser ou de dilater des périodes du mouvement (voir Figure 2.13(a)). Cependant, une attention particulière doit être

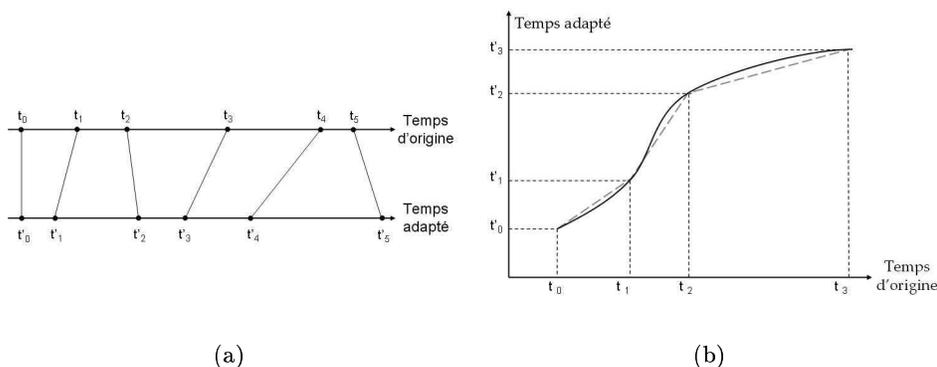


FIG. 2.13 – Déformation dynamique du temps [GR96]. (a) Les différentes phases des mouvements sont compressées ou dilatées temporellement afin de les faire correspondre. (b) La monotonie et la continuité du recalage temporel sont indispensables pour éviter les discontinuités [MKMA04].

apportée sur ces changements temporels. En effet, la fonction qui associe le temps réel et le temps adapté doit être monotone afin d'éviter tout retour en arrière dans le temps. De plus, les compressions et dilatations temporelles entraînent des discontinuités au niveau des vitesses du mouvement. Il faut donc en plus assurer que cette fonction est de continuité C^2 (voir Figure 2.13(b)).

La déformation dynamique du temps peut ainsi être utilisée pour synchroniser automatiquement deux mouvements en fonction des contraintes d'appui sur le sol [MMKA04]. Un ensemble d'appuis possibles est défini ainsi qu'un opérateur qui vérifie la compatibilité de ces appuis. Par exemple, un support à gauche uniquement n'est pas compatible avec un support à droite uniquement. Lorsqu'une incompatibilité est détectée, il est alors possible de déformer localement l'échelle de temps d'un ou de plusieurs mouvements. Cette opération est effectuée jusqu'à ce que l'incompatibilité disparaisse. Cette approche se limite cependant aux appuis des pieds sur le sol et doit être étendue pour gérer d'autres types d'événements pouvant eux-aussi conduire à des incompatibilités.

D'autres critères de synchronisation des mouvements ont été proposés dans la littérature : en faisant correspondre les propriétés cinématiques du mouvement (positions et vitesses) [AW00, AW01, AW03], en détectant les instants où l'accélération des extrémités (mains ou pieds) devient nulle ou s'inverse, ou encore en trouvant des corrélations entre les positions, vitesses et accélérations pour les mouvements cycliques [RGBC96].

Une fois que les échelles temporelles des différents mouvements à combiner sont compatibles (c'est-à-dire que les principaux événements correspondent), il reste à définir un algorithme permettant de mélanger les postures à chaque pas de temps de manière réaliste. Le mélange des trajectoires synchronisées s'effectue principalement par com-

binisation linéaire ou somme pondérée [GR96, WH97, AW00, PSS02, PSKS04]. Cette méthode a été appliquée à la locomotion humaine en considérant quatre types de démarches [GR96] : marche avec des pas courts, avec des pas longs, course à petits pas et à longs pas. La Figure 2.14 montre un exemple d'interpolation appliquée à la locomotion humaine.

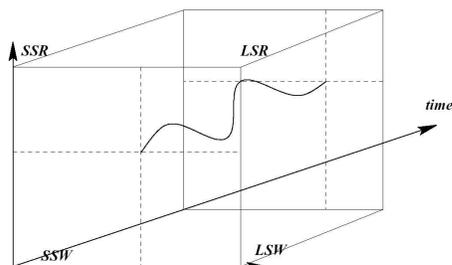


FIG. 2.14 – Un exemple de trajectoire articulatoire décrite à partir de quatre trajectoires de référence [GR96].

De manière plus générale, on peut considérer le mouvement humain comme une phrase comportant des verbes (les actions) et des adverbess (les caractéristiques telles que la fatigue et le stress). Au final, les mouvements de référence de même nature (même action) sont mélangés en interpolant/extrapolant les trajectoires sur l'espace des attitudes caractéristiques [RCB98].

Toutes les techniques présentées ci-dessus obligent généralement à connaître la totalité du mouvement à l'avance afin de les recaler temporellement. D'autres approches ont donc été proposées pour composer plusieurs mouvements en temps réel. Dans ces approches, on associe une priorité à chaque mouvement et sur chaque degré de liberté [BBET97, MKMA04]. Il est ainsi possible de combiner la cinématique des jambes d'un mouvement de marche à celle des bras lors d'une préhension. La continuité du mouvement est assurée par une déformation continue et dérivable des priorités. Au final, le mouvement combiné est une somme pondérée des configurations instantanées de chaque mouvement d'origine. Cependant, cette technique doit préalablement faire appel à une synchronisation par dilatation non-uniforme du temps, comme nous l'avons vu précédemment. Cette déformation doit être capable de proposer une solution quasi-instantanée, avec une connaissance très limitée des événements futurs. Dans certains cas, les résultats peuvent produire des séquences moins réalistes que les approches raisonnant sur la totalité de la séquence.

2.3.4.4 Utilisation et validation de base de données

D'après ce que l'on vient de voir, il apparaît clairement que l'utilisation de collections ou de base de données de mouvements permet la représentation d'une large portion des possibilités de mouvements réalisables par un même humanoïde, ou de nombreuses variations sur le même mouvement. Lorsque l'on dispose d'une base de données comportant de nombreuses variations de mouvements, plusieurs méthodes peuvent être utilisées

pour en générer de nouveaux :

- *Interpolation basique*. L'interpolation simple entre les mouvements a montré sa force dans le cas de mouvements simples comme le pointage ou atteindre un objet distant [WH97].
- *Décomposition dans le plan comportemental ou fréquentiel*. L'idée est ici d'exprimer l'ensemble des mouvements dans un espace comportemental, stylistique ou émotionnel. Plusieurs méthodes existent : décomposition dans l'espace de Fourier [UAT95], dans un espace de fonction à bases radiales [RGBC96] ou en chaînes de Markov cachées [BH00].
- *Modèles physiques*. L'utilisation d'une base de données de mouvements fonctionne aussi dans le cas de la simulation dynamique : Lamouret et Van de Panne [LV96] utilisent un ensemble de mouvements simulés par modèles physiques pour générer le mouvement d'une lampe bondissante en fonction de contraintes décrites par l'utilisateur et en fonction de l'environnement des transitions dans cet ensemble de mouvements.
- *Modèles statistiques*. Ces méthodes permettent de réaliser une généralisation du mouvement, et de réutiliser le résultat dans un modèle de synthèse. Dans ce cas, on ne réutilise pas directement le mouvement enregistré. Citons entre autre les méthodes à base d'analyse en composantes principales [Bow00] ou de minimisation d'entropie croisée [BH00]. La difficulté revient dans ce cas à ne pas délaisser des détails du mouvement qui pourtant contribuent grandement à leur réalisme.
- *Réutilisation du meilleur mouvement*. Dans ce cas, on suppose avoir à disposition de très grandes bases de données qui comportent de nombreuses variations des mouvements. La problématique revient alors à classer cette base en sous-classes (*clustering*) [LCR⁺02], et à décomposer ces mouvements en graphe [KG04] ou en structures probabilistes comme des chaînes de Markov [LCR⁺02]. Certaines problématiques font référence au problème générique d'indexation dans la mise en œuvre de ces recherches.

L'utilisation d'une base de données de mouvements semble être une voie prometteuse permettant de pallier le manque de flexibilité des méthodes basées sur la capture de mouvements.

Growhow et coll. [GMHP04] proposent de résoudre des problèmes de type cinématique inverse en se basant sur un ensemble de mouvements capturés. Le système revient à rechercher la posture la plus crédible possible dans cet ensemble pour résoudre les contraintes. Cette méthode permet de conserver le style du mouvement, tout comme l'approche de Glardon et coll. [GBT04a] et de Oshita et coll. [OM01] qui corrèle l'interpolation avec les vitesses des mouvements capturés.

Un autre type d'application possible de ces bases de données s'est développée récemment, il s'agit du couplage entre réaction dynamique et adaptation/mélange de mouvements. Cela se traduit généralement par la recherche de la réponse la plus probable à une force d'impact ponctuelle. Quelle soit résolue par mélange de mouvement [ZMCF05], par graphe de mouvement [AFO05] ou par cinématique inverse basée sur les moments [KHL05], la base de données est utilisée comme source de réaction potentielle. Dans ces approches les auteurs ont dû capturer des mouvements de réaction à des pous-

sées, voire de chutes. Afin d'augmenter l'efficacité de la recherche de la réponse la plus probable, Tang et coll. [TPZZ06] utilisent deux processus parallèles. Le premier estime rapidement, grâce à un calcul basse fréquence, les meilleurs réponses possibles dans la base de données alors que le second calcule précisément la réaction dynamique.

Cette combinaison de mouvements part du principe que l'association de mouvements naturels produit un mouvement également naturel, afin d'éviter de codifier toutes les lois qui gouvernent le contrôle moteur. Cependant, après avoir subi une déformation dynamique du temps puis une combinaison linéaire avec d'autres gestes, un mouvement peut très bien ne plus respecter les lois de la physique. Ainsi, il est possible de diagnostiquer quelles contraintes mécaniques doivent être prises en compte pour effectuer ces mélanges [SH05]. Les auteurs, ici, analysent des mouvements interpolés via un certain nombre de propriétés physiques : (1) le moment linéaire et angulaire pendant les phases de vol ; (2) le contact au sol, l'équilibre statique et les frottements au sol en phase de support ; (3) la continuité des positions et des vitesses entre les phases. En partant de l'hypothèse que les mouvements originaux, servant à l'interpolation, sont physiquement corrects, typiquement le cas avec des mouvements capturés, ils vérifient la conservation de la justesse des paramètres ci-dessus dans un mouvement interpolé. Cette analyse donne également des pistes quand aux modifications possibles des algorithmes d'interpolation qui pourraient produire ainsi des mouvements plus naturels. Les algorithmes développés dans cette approche sont cependant utilisables uniquement sur des mouvements linéairement interpolés. Une approche basée sur la résolution des lois de la dynamique et non plus sur la conservation de ses propriétés est alors une solution envisageable. Dans ces deux optiques différentes, un problème reste identique : la modification du mouvement en fonction du résultat de l'analyse.

Un autre moyen de valider des mouvements interpolés, est de comparer les paramètres dynamiques produits, comme les torseurs aux articulations, et de comparer leurs évolutions à des données réelles, en utilisant des moyens comme des plateformes de forces ou des données de la littérature en analyse par dynamique inverse [VDO99, FDCM97].

Malgré ces limitations, la combinaison de mouvements est très largement employée, même dans les systèmes professionnels d'animation puisqu'elle permet de calculer intuitivement de nouveaux mouvements sans nécessiter de nouvelles captures. Mais contrôler le mouvement finement pour respecter des contraintes de positionnement dans l'espace n'est pas assuré par nature.

2.4 Cas de la locomotion humaine

La locomotion humaine est primordiale pour la création d'humanoïdes évoluant dans des univers tridimensionnels. En effet, l'un des premiers mouvements que l'on cherche à représenter est le déplacement. Quelque soit la technique d'animation choisie, l'un des principaux problèmes de la locomotion réside dans les interactions du personnage avec son environnement (c'est-à-dire principalement le contact pied-sol). Ce problème est d'autant plus important que, périodiquement, les deux pieds sont en contact avec le

sol en même temps.

La locomotion humaine est un mouvement quasi-périodique que des scientifiques de tous horizons étudient. Dans ce domaine, Marrey [Mar94] a proposé une étude de la cinématique du mouvement humain qui permet de mieux comprendre la structure de la locomotion humaine. De nombreuses recherches ont suivi ces travaux [PV83, Eno94] et permettent de définir un ensemble d'invariants tels que la décomposition structurelle en phases (voir Figure 2.15).

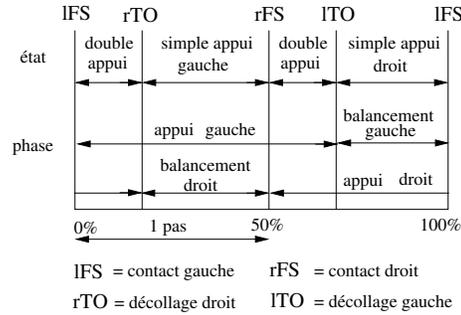


FIG. 2.15 – Phases caractéristiques de la marche humaine.

Un cycle complet de marche est défini du décollage du pied gauche à un nouveau décollage de ce même pied. Un pas est défini comme un demi-cycle, du décollage d'un pied au décollage de l'autre pied. Dans un cycle, on peut identifier un contact du pied droit, un décollage du pied droit, un contact du pied gauche et un décollage du pied gauche. Plus globalement le cycle de marche est souvent représenté comme une suite de simples et doubles contacts avec le sol. Par contre, la course peut être définie par une suite de simples contacts et de phases de vol [NTH85]. Ces différentes phases peuvent être modélisées par des automates cycliques hiérarchisés [Mul98] (voir Figure 2.16).

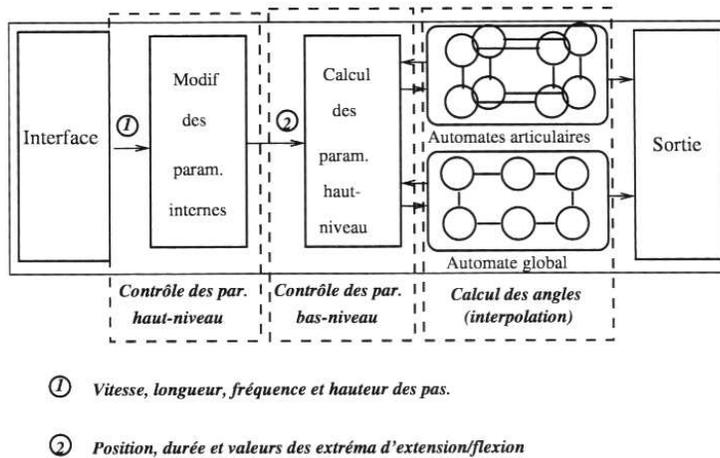


FIG. 2.16 – Synopsis du système de locomotion de Multon [Mul98].

Des états de l'art dans ce domaine peuvent apporter des précisions sur de nombreux points tels que l'analyse de la marche et l'identification de contraintes associées [VPPE85], l'application au domaine de l'animation [MFCGD99] et de la modélisation [ASH05].

Une méthode pour générer des mouvements est d'utiliser les connaissances acquises par des analyses menées en biomécanique sur la forme de trajectoires articulaires. Bien évidemment, de telles connaissances n'existent que pour les mouvements les plus étudiés, comme la locomotion. On dispose donc, pour ce type de mouvement, d'un grand nombre de connaissances. En effet, les trajectoires articulaires des membres inférieurs sont bien connues [Ale84, Pat91] et plusieurs études ont montrées, entre autres, l'influence de la vitesse [NTH85] sur ces locomotions. C'est aussi l'un des premiers mouvements utilisé pour l'animation puisqu'il permet à l'humanoïde de se déplacer dans l'environnement. De nombreux modèles descriptifs de locomotion sont donc apparus dès le début des années 1980 [Zel82, Zel83] jusqu'à nos jours [SM01]. Ces approches procédurales consistent à décomposer le mouvement en sous-phases (présentées ci-dessus), chacune associée à un état d'automate à états finis. Les positions intermédiaires sont interpolées. Comme dans toutes les méthodes à base de cinématique directe, le contrôle des extrémités des chaînes articulées est un problème délicat, comme par exemple le contact entre le pied et le sol dans le cadre de la locomotion. Bruderlin et coll. [BC89, BC93, BC96] ont proposé de changer dynamiquement la racine de la hiérarchie en la plaçant toujours sur un pied au sol, afin de respecter plus facilement sa position.

Cependant, les angles issus de la littérature en biomécanique sont généralement des moyennes qui ne correspondent pas spécifiquement au squelette à animer. Les animations calculées de la sorte peuvent donc comporter un certain nombre d'artefacts. Plusieurs améliorations ont été apportées pour assurer un contact sans glissement des pieds sur le sol pendant les phases d'appui [Gir87, BT92, KGS02]. Des méthodes d'adaptation de mouvements sont alors utilisées comme la cinématique inverse. L'intérêt de ces méthodes est que l'on dispose d'un modèle paramétrable de locomotion pouvant s'adapter à différents personnages et pouvant guider le mouvement par des empreintes sur le sol [Van97].

2.5 Résumé

L'animation de personnages répond à des contraintes très différentes en fonction du type d'application. Dans des applications interactives, la capture de mouvements peut être utilisée directement pour animer des humanoïdes en temps-réel. C'est pourquoi de récentes approches se focalisent sur les calculs, en temps interactif, permettant de traiter les trajectoires pour adapter le mouvement à de nouvelles contraintes pour de multiples personnages [Kul05]. À l'opposé, dans le domaine de l'audiovisuel, et en particulier la production de films de synthèse, il est généralement nécessaire d'adapter les données mesurées à un squelette synthétique et à un environnement différent. De plus, dans ce domaine, le mouvement mesuré est modifié manuellement pour accentuer un style imposé par le personnage. Dans ce type d'application, le réalisme est le point

clé et le temps de calcul devient moins primordial. Il est alors tout à fait envisageable d'utiliser des méthodes d'édition de mouvements pouvant tenir compte de la dynamique pour simplifier le travail des animateurs. En effet, ces derniers peuvent se focaliser sur le style et les tâches que le personnage doit réaliser sans se soucier des lois de la physique qui doivent être respectées. Dans ce cas, les méthodes basées sur un modèle mécanique de squelette et incluant un processus d'optimisation peuvent fournir des résultats intéressants.

Cependant, même si le temps de calcul n'est pas primordial, s'il y a un grand nombre de personnages à animer, des techniques moins coûteuses doivent être envisagées. En effet, si la base de données de mouvements utilisée est assez volumineuse, il est possible de chercher un geste qui correspond au mieux à la situation et d'effectuer une simulation mécanique uniquement lors des phases de transition [ZMCF05] ou sur un modèle simplifié [AFO05]. La deuxième solution semble la plus intéressante car c'est celle qui nécessite le moins de captures de mouvements, c'est donc la moins onéreuse.

Même si les temps de calculs sont bien inférieurs à ceux nécessaires à l'optimisation d'un système mécanique, ces techniques ne sont pas utilisables dans des environnements temps-réel où l'utilisateur peut intervenir à chaque instant pour modifier les contraintes de l'environnement. Dans le domaine des jeux interactifs, le personnage synthétique doit, par exemple, être capable d'interagir avec un objet qui est lui-même piloté indirectement par un utilisateur. Les graphes de mouvements peuvent répondre à ce type de problématique en préservant complètement le style initial contenu dans les mouvements capturés. Cependant, cette méthode nécessite une grande base de données qui engendre un coût de production et un volume de stockage importants. À l'opposé, les modèles descriptifs se contentent de très peu de données lors de l'animation temps réel mais requièrent des analyses spécifiques pour chaque mouvement. Si on souhaite préserver un style particulier dans le geste, il est nécessaire d'utiliser des techniques de type ACP. Cependant, les variables qui sont issues de ces analyses ne sont pas intuitives, ce qui rend le contrôle du mouvement très difficile.

L'utilisation de contraintes spatio-temporelles permet au contraire un contrôle intuitif du mouvement. Nous avons vu que le principal problème est alors de résoudre efficacement ces contraintes aux temps imposés et ensuite d'assurer la continuité. Les cartes de déplacement sont maintenant largement utilisées pour répondre à ce type de problème car elles offrent des temps de calcul bien inférieurs à ceux obtenus avec des techniques d'optimisation. Toutefois, ces temps de calcul sont encore généralement trop élevés pour utiliser ces techniques en environnement temps-réel. Ceci est dû en partie au fait que ces techniques raisonnent sur un geste global alors que des modifications peuvent être requises à n'importe quel instant, de manière imprévisible. Une autre raison concerne le nombre d'itérations nécessaire et le temps passé à chaque itération.

Concernant le nombre d'itérations, pour des applications critiques du point de vue du temps de calcul, une alternative est de résoudre le problème à chaque pas de temps en faisant varier de manière continue l'influence de chaque contrainte. Par contre, le temps

passé à chaque itération est fortement lié à la méthode de cinématique inverse employée pour résoudre les contraintes. Le problème que cette cinématique inverse doit résoudre provient du fait que les contraintes sont généralement exprimées dans l'espace Cartésien alors que le mouvement est encodé par des trajectoires articulaires. Il serait certainement pertinent de trouver une représentation qui permette de simplifier cette résolution de contraintes. De plus, si cette résolution était capable de respecter directement les lois de la mécanique, un plus haut niveau de réalisme pourrait être atteint sans avoir recours aux techniques d'optimisation de systèmes dynamiques. Or, en raison des redondances, il existe une infinité de postures qui permettent de résoudre des contraintes imposées dans l'espace Cartésien. Il est donc impossible de résoudre ce problème de manière analytique si on cherche à gérer le corps humain dans son ensemble.

Outils	Coût	Avantages	Limitations
Approches procédurales	$O(n)$	coût de calcul faible	pas d'effet dynamique automatique
Corrections cinématiques	$O(n^3)$	assure des poses réalistes	pas d'effet dynamique automatique, cohérence entre modules
Contraintes dynamiques	$O(n)$	empêche des effets dynamiques non-réalistes	effets dynamiques désirés, implique des contraintes spécifiques, cohérence entre modules
Contraintes spatio-temporelles	$O((n)^2)$	interpolation dynamique	grand coût de calcul
Simulation	$O(n^3)$	correct pour des effets dynamiques, génération de code automatique	coût de calcul, calibration des paramètres
Édition de mouvements	$O(n)$	coût faible, trajectoire réaliste	contrôle interactif difficile, volume des données

TAB. 2.2 – Comparaison des différentes méthodes d'analyse et de synthèse.

En comparaison aux techniques procédurales et cinématiques, les techniques de modification de mouvement offrent l'avantage d'utiliser intrinsèquement des mouvements réalistes, grâce à la capture de mouvement, pour animer des humains virtuels. De plus, ces techniques fournissent aux animateurs des outils qui sont compatibles avec les utilisations habituelles des trajectoires par positions clés. Mais d'un autre côté, le réalisme intrinsèque des trajectoires capturées peut être perdu par des modifications extrêmes. En effet, les modifications appliquées aux trajectoires n'assurent pas la préservation de la dynamique des mouvements humains. L'utilisation couplée de l'adaptation avec des

connaissances sur les mouvements humains et avec des contraintes dynamiques permet de résoudre les problèmes du type interpénétration du pied dans le sol ou glissements. Ainsi, grâce à des méthodes d'analyse du mouvement à partir de base de données, de nombreuses utilisations donnent lieu à différentes applications directes ou indirectes. Par exemple, plusieurs auteurs [SPB⁺98, BST00] ont proposé de retrouver la position du centre de rotation d'une articulation à partir d'un marqueur, dans le repère local du segment auquel il est rattaché. Ce type de méthode est applicable avec des systèmes basés sur des données de marqueurs magnétiques [OBBH00, KOF05], optiques [SPB⁺98, ZV03] ou purement vidéo [BMP04].

Bien que la qualité des animations produites par les techniques procédurales dépend des modèles, la qualité des séquences résultantes dépend de l'aptitude des utilisateurs. Pour les techniques de *motion warping*, il n'existe pas de contrôle qui assure que la séquence résultante est celle désirée. Par conséquent, l'utilisateur d'un tel système doit modifier les paramètres des trajectoires, comme les pondérations des fonctions d'interpolation, afin d'obtenir le mouvement désiré.

Le Tableau 2.2 résume les principaux avantages et les limitations des différentes méthodes. Les coûts de calcul sont effectués en fonction de n : le nombre de degrés de liberté. Si l'on prend en compte les contraintes telles que le contact pied-sol, un coût additionnel en $O(n^3)$ est généré par l'algorithme de cinématique inverse requis. Pour la locomotion humaine, la manière dont évoluent les trajectoires angulaires, dépendant de paramètres haut niveau (comme la vitesse, la longueur des pas ou leur fréquence), doit être décrite a priori. C'est pourquoi, l'animateur doit généralement créer entièrement un nouveau modèle pour un nouveau mouvement. Pour l'édition de mouvement, le coût de calcul est en $O(n)$ car chaque articulation est calculée séparément.

L'analyse et la synthèse de mouvements d'humains virtuels répondent à des contraintes très différentes en fonction du type d'application visée. Mais il faut toujours faire un compromis entre l'interactivité (être en temps-réel ou non par exemple), le réalisme (s'attacher à un mouvement physiquement réaliste ou bien obtenir un mouvement visuellement valide par exemple) et la généricité (travailler sur une classe de mouvement spécifique ou bien sur un mouvement quelconque d'humanoïde par exemple). Dans cette thèse, nous présentons une approche de synthèse et d'analyse de mouvements de locomotion qui sont produits cinématiquement, validés physiquement, puis réutilisés pour la production de nouveaux mouvements. Nous nous sommes, à l'analyse de cet état de l'art et au regard de nos objectifs, concentré en premier lieu sur une méthode d'adaptation basée sur des interpolations dans une base données de mouvements (chapitre 3). Cette méthode ne tenant pas compte des propriétés physiques du mouvement, nous nous sommes ensuite intéressés à l'analyse du respect des lois de la dynamique dans de tels mouvements, ainsi qu'à l'étude de l'influence de l'adaptation sur leurs dynamiques (chapitre 4). Puis nous reproduisons un mouvement physiquement réaliste décrit par l'évolution des torseurs au cours du temps (chapitre 5). Ces trois parties, indépendantes mais complémentaires, sont présentées par la description des trois aspects fondamentaux qui ressortent de cet état de l'art : la modélisation de l'humain, la modélisation du mouvement et les méthodes de calculs appliquées sur ces modélisations.

Chapitre 3

Adaptation cinématique dimensionnelle

Aux vus de nos objectifs et de l'analyse de cet état de l'art, nous concentrons nos premiers travaux sur une méthode d'adaptation basée sur des interpolations cinématiques dans une base de données de mouvements (voir Figure 1.3). En effet, notre premier objectif est de créer un mouvement sous contraintes, et dans la mesure où nous nous focalisons sur un style de mouvement : la locomotion, l'utilisation d'une collection de données réelles semble être la méthode appropriée. Elle nous permet effectivement de travailler sur de nombreuses variations d'un mouvement de locomotion. Donc pour adapter une locomotion de référence, toute la difficulté réside dans la prise en compte des contraintes et de leurs influences sur le mouvement à la fois au niveau de l'analyse et de la synthèse.

L'idée maîtresse a été ici de séparer les interpolations suivant les paramètres cinématiques influents des différents axes anatomiques. Ces axes sont les axes définissant les trois plans orthogonaux classiques en biomécanique : frontal, sagittal et horizontal. La Figure 3.1 montre une vision globale du module d'adaptation. Le principe en est le suivant. Nous avons en premier lieu effectué des captures de mouvements suivant plusieurs critères locomoteurs (tels que la longueur de pas), nous obtenons ainsi une base de données organisée dont nous extrayons les informations pertinentes de la locomotion et les données de profils de vitesse. Ces profils de vitesse seront utilisés pour temporeliser le mouvement interpolé. L'utilisation de données anatomiques, d'empreintes au sol et d'une posture de référence (posture prise par l'humanoïde au repos) sera à la base de la méthode d'adaptation. Un module de cinématique inverse et des traitements de reconstruction sont ensuite appliqués sur le mouvement afin de calculer l'animation finale.

Nous présentons, dans ce chapitre, cette méthode d'adaptation cinématique dimensionnelle. Pour cela, nous présentons d'abord notre modélisation des mouvements de locomotion (section 3.1) qui a guidée celle des humanoïdes (section 3.2). Puis nous exposons le cœur de la méthode d'interpolation en section 3.3 et les post-traitements nécessaires pour calculer le mouvement définitif en section 3.4. Enfin, les résultats ob-

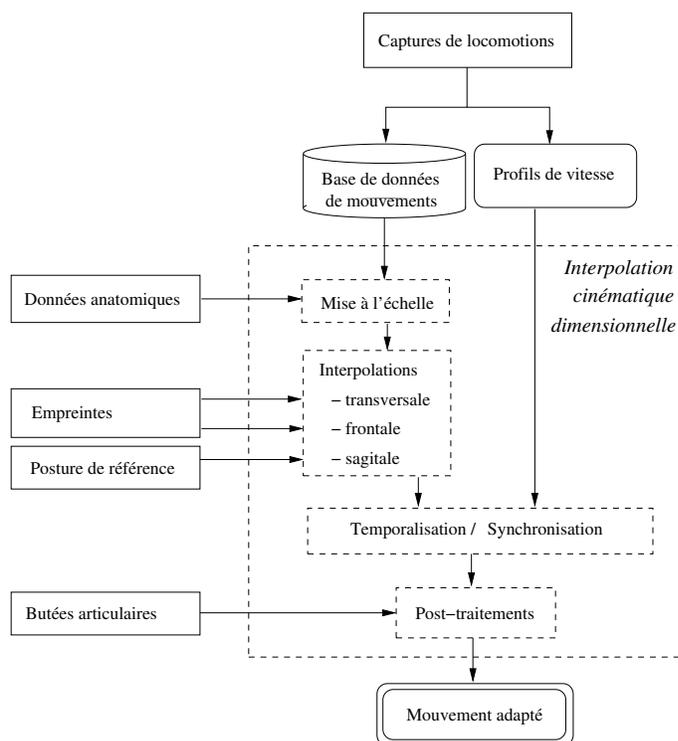


FIG. 3.1 – La méthode d’adaptation proposée utilise les données réelles de locomotions capturées et calcule une locomotion probable associée à différents paramètres et hypothèses locomoteurs (détail de la Figure 1.3).

tenus sont présentés et discutés en section 3.5.

3.1 Modélisation de la locomotion

Les manipulations mathématiques nécessaires aux méthodes d’interpolation nous imposent de modéliser les mouvements. Mais avant d’étudier la représentation que nous avons choisie, nous indiquons quelques prétraitements indispensables.

1. **Une reconstruction** des marqueurs manquants. En plus du traitement possible mais optionnel applicable généralement par le fournisseur du matériel de capture de mouvement, nous effectuons une reconstruction automatique par splines des intervalles de marqueurs manquants. Nous supprimons également les données d’éventuels marqueurs fantômes. Ces méthodes sont inspirées des travaux de Ménardais [Mén03].
2. **Une réorientation** de la locomotion. Afin de paramétrer correctement les calculs intervenant dans les interpolations nous réorientons la locomotion suivant un axe prédéfini du repère global de la scène : le sens de la locomotion, défini suivant l’axe \vec{x} positif. Pour ce faire, nous avons testé trois méthodes : une méthode locale, une

méthode locale moyenne et une méthode globale. Dans la méthode locale nous calculons à chaque pas de temps, l'angle au sol entre l'axe \vec{x} et le projeté au sol de la droite passant par des marqueurs opposés tels que ceux des hanches ou les épaules. Cette méthode a l'intérêt d'être applicable sans précalcul, en temps réel, mais elle peut induire des erreurs de trajectoires pour des mouvements à fortes rotations interne/externe du tronc. D'où l'idée de passer ces calculs en prétraitement et d'appliquer uniquement sur le mouvement une moyenne des valeurs obtenues. Le seul inconvénient restant apparaît lors de mouvements courts où la moyenne n'est pas assez significative. Nous avons donc utilisé une autre méthode où nous calculons l'axe de déviation global de la locomotion à partir de quelques positions du marqueur racine de l'humanoïde (voir section 3.1.1 pour la méthode de positionnement) au début et à la fin du mouvement. Les résultats avec cette méthode montrent à la fois une meilleure stabilité du mouvement et une bonne précision de l'estimation de l'axe de déviation même pour des mouvements courts.

3. **Une identification des cycles.** Comme nous l'avons vu dans l'état de l'art, la locomotion est un mouvement cyclique. Nous allons donc travailler dans toute la suite de notre travail sur un seul cycle, en gardant à l'esprit que l'on peut enchaîner facilement les cycles pour produire un mouvement continu et infini. Cette "cyclification" se base sur la répétition du passage des marqueurs de la cheville à la verticale de la racine de l'humanoïde.

Nous pouvons, par ces traitements, constituer notre base de données de locomotions reconstruites, orientées sur un même axe de déplacement et isolées par cycle.

3.1.1 Définition des centres articulaires

Comme nous venons déjà de l'apercevoir, les positions des centres articulaires sont des données primordiales dans la modélisation du mouvement et de l'humain. Une méthode possible de définition des centres articulaire consiste à estimer les centres articulaires à partir de l'évolution des membres liés par les articulations. Dans ce type d'approche la position du centre articulaire est une moyenne du point d'intersection des segments définissant les membres.

Dans notre approche, nous calculons ces positions à chaque pas de temps suivant un protocole associant marqueurs réels et virtuels. Définissons le mouvement comme une séquence de postures $M(t_i) = \{P_i(L_1), P_i(L_2), \dots, P_i(L_k)\}$ où $P_i(L_k)$ est la position tridimensionnelle du marqueur réel L_k au pas de temps $i \in [1, \dots, N_T]$ où N_T est le nombre de pas de temps. Le but est de calculer les positions $P_i(a)$ de chaque articulation a .

Nous avons donc à définir les associations d'au moins une position $P(L_k)$ à une position $P(a)$. Le principal intérêt est que cela nous permet de définir des positions précises de centres articulaires (voir Figure 3.2) mais aussi de marqueur virtuel tel que la racine de l'humanoïde (en utilisant des marqueurs placés sur le bassin par exemple).

Ce module est indépendant du protocole d'acquisition et de labellisation des marqueurs, ainsi, grâce à cette méthode d'association automatique, nous pouvons gérer

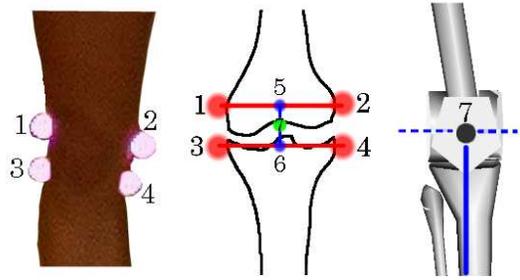


FIG. 3.2 – Exemple du genou. Nous plaçons 4 marqueurs sur les épicondyles latéraux (1=fémur, 3=tibia) et médiaux (2=fémur, 4=tibia). Les points 5, 6 et 7 sont les milieux de [1,2], [3,4] et [5,6]. Nous considérons le point 7 comme le centre articulaire du genou. L'articulation du genou est définie par ce point 7 dont les axes de rotations dépendent des positions des systèmes articulaires voisins : la hanche et la cheville.

n'importe quel mouvement issu de n'importe quelle capture avec uniquement la condition que l'on puisse associer au moins un marqueur réel à chaque articulation virtuelle. Cette première approximation des positions des centres articulaires est suffisamment précise pour nos objectifs applicatifs en informatique graphique, mais reste bien entendu à améliorer pour des applications biomédicales où les modèles de centres articulaires doivent par exemple incorporer davantage de degrés de liberté (déplacement du centre articulaire en fonction de la configuration des segments liés par exemple).

3.1.2 Représentation paramétrique : la poulaine

Notre idée d'adaptation se base sur l'influence séparée de paramètres cinématiques. Nous devons donc mettre en relation une représentation paramétrique d'un cycle de locomotion avec ces paramètres.

Nous avons choisi de représenter un cycle de locomotion par sa poulaine.

Définition : La poulaine est le déplacement Cartésien de la cheville exprimé dans le repère racine de l'humanoïde.

Nous travaillons avec cette représentation pour plusieurs raisons :

- Elle possède intrinsèquement les caractéristiques principales du mouvement [Whi91].
- Elle est maniable, c'est-à-dire qu'il est facilement possible de la modifier afin d'adapter la locomotion tout en conservant ses caractéristiques [Mul98].
- Elle est particulièrement bien adaptée, en tant que trajectoire d'effecteur, aux calculs de cinématique inverse.
- Elle est compacte. Nous allons voir que cette trajectoire cartésienne se modélise de façon compacte, elle est légère en occupation mémoire et en manipulation algorithmique.

Comme le montre Whittle [Whi91], des études en biomécanique indiquent que la tra-

jectoire du pied dépend de plusieurs paramètres tels que l'anatomie, la vitesse de déplacement et la longueur de pas. En conséquence, la modification de l'un de ces paramètres doit nécessairement impliquer une adaptation de la trajectoire du pied. Néanmoins, les règles exactes régissant tous ces paramètres ne sont pas à l'heure actuelle disponibles en biomécanique. Par contre, des interpolations dans de suffisamment grandes bases de données peuvent fournir une linéarisation de ces règles afin d'effectuer des adaptations morphologiques et locomotrices. Notre modélisation de mouvement par sa poulaine se positionne exactement dans cette optique.

Bien que la forme des poulaines de locomotions assez extrêmes (très fléchies par exemple) soient souvent assez différentes entre elles, leurs caractéristiques premières sont conservées. Nous définissons un modèle générique basé sur quatre points caractéristiques présentés en Figure 3.3.

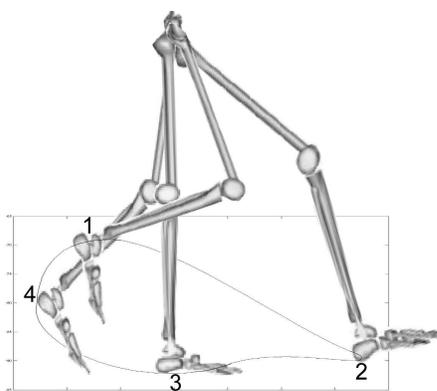


FIG. 3.3 – Les positions des quatre points caractéristiques d'une poulaine lors d'un cycle de locomotion.

Deux propriétés nous ont incités à utiliser ces points caractéristiques : ils vont nous permettre de modéliser facilement la trajectoire globale par quatre sous courbes, et ils correspondent tous à un moment particulier du cycle.

- Le point 1 représente le moment où la cheville atteint son altitude maximale. Sur la trajectoire, ce point possède la composante verticale la plus grande.
- Le point 2 représente l'extension maximale de la jambe. Sur la trajectoire, ce point possède la composante horizontale la plus élevée.
- Le point 3 représente le moment où la cheville passe à la verticale de la racine pendant la phase de support, définissant ainsi une posture de référence. Sur la trajectoire, ce point est le point le plus proche horizontalement de l'origine.
- Le point 4 représente la flexion maximale de la jambe. Sur la trajectoire, ce point a la composante horizontale la plus petite.

La représentation mathématique de la poulaine doit être paramétrable par ces points. Elle doit également être au moins cubique afin d'assurer la continuité entre les quatre sous-courbes définies par les points caractéristiques. Il existe plusieurs types de modélisations respectant ces contraintes, nous avons choisi de représenter les quatre morceaux de la trajectoire par quatre courbes paramétrées de Coons [Coo67], car le

nombre de paramètres utilisés dans cette modélisation est minimal.

Chacune des quatre courbes $C_{i=\{1\dots4\}}$ est définie par deux des quatre points caractéristiques P en positions c et tangentes t : $P_{j=\{1\dots4\}} = \{c_{x_j}, c_{y_j}, c_{z_j}, t_{x_j}, t_{y_j}, t_{z_j}\}$ de telle façon que $C_i = \{P_a, P_b\}$ avec $a, b \in \{1\dots4\}$. Les notations et propriétés mathématiques liées aux courbes de Coons sont précisées en Annexe A. Les tangentes sont calculées automatiquement par un algorithme itératif qui recherche les valeurs qui minimisent la distance entre la trajectoire réelle et la trajectoire calculée. Après avoir défini un intervalle de recherche de chaque tangente t_j et un seuil ε sous lequel nous supposons que la distance entre deux points est acceptable, nous itérons sur les valeurs des tangentes, créons la courbe N_i correspondante et vérifions la distance, ceci jusqu'à ce que $|C_i - N_i| < \varepsilon$. Nous avons choisi une valeur de seuil ε correspondant à la précision du système de capture de mouvement, valeur significative minimale. La Figure 3.4 montre 6 exemples de poulaines 3D construites en utilisant cet algorithme. En section 3.5.1, nous exposons les résultats de l'évaluation de la qualité de la modélisation.

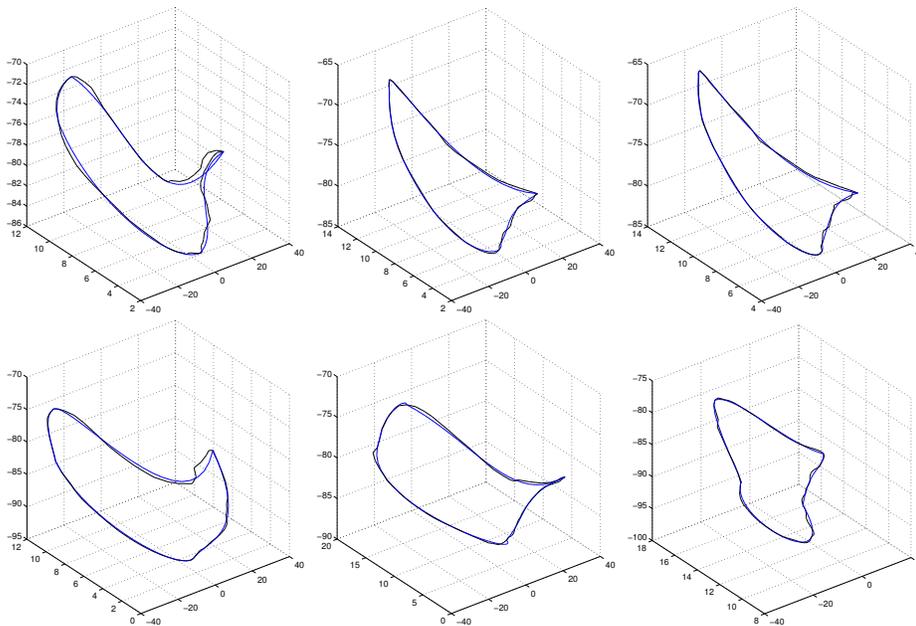


FIG. 3.4 – Les poulaines réelles (en noir) sont chacune modélisées par des courbes de Coons (en bleu) dont les positions et tangentes sont calculées automatiquement. Unité en centimètre.

Nous réussissons ainsi à modéliser une locomotion par 2 (positions/tangentes) \times 4 (points caractéristiques) valeurs, ce qui montre la légèreté des données utilisées et l'intérêt d'une telle représentation où l'on peut stocker une base de données de 1000 mouvements sur $1000 \times 8 \times 4 = 32000$ octets, c'est-à-dire environ 31ko.

3.1.3 Construction de la base de données de mouvements capturés

Après avoir modélisé les locomotions par leurs poulaines, la création de la base de donnée est directe. En plus d'un identificateur, un élément de la base contient une description de la locomotion sous forme de mots clés et également les longueurs estimées des membres inférieurs qui seront nécessaires lors de l'adaptation et plus précisément lors de la mise à l'échelle de la base de données.

Ces longueurs sont calculées comme une moyenne sur tout le mouvement des distances entre les centres articulaires. Notons de plus qu'un mouvement brut capturé peut comporter plusieurs cycles de locomotion. Lorsque cela est le cas, les différents cycles sont stockés séparément mais conservent bien entendu les mêmes valeurs de longueurs de membres. Ce traitement est automatique et permet d'obtenir un grand nombre de cycles avec peu de captures.

3.2 Définition d'une chaîne cinématique

Nous venons de présenter notre modélisation du mouvement, nous allons maintenant nous intéresser à celle de l'humanoïde. Nous utilisons une chaîne cinématique pour représenter les membres inférieurs de l'humanoïde. Nous nous intéressons, dans cette partie, uniquement à représenter la partie inférieure du squelette (voir Figure 3.5(a)) car l'interpolation ne s'effectue que sur les caractéristiques morphologiques la concernant. Cette chaîne est composée de cinq corps rigides qui modélisent les membres du squelette : un bassin, deux fémurs et deux tibias. Nous nous sommes limités à cette chaîne pour des raisons de cadre applicatif expliquées en section 3.2.2. Mais la chaîne finale animée est complète et contient notamment le pied et le haut du corps (voir section 3.4.3). La racine de cette chaîne est le centre du pelvis, définie comme l'équibarycentre des quatre marqueurs placés aux épines iliaques antéro-supérieures et postéro-supérieures gauches et droites. Le corps rigide du bassin possède une articulation à 3 degrés de liberté modélisée par une liaison rotule. Chaque hanche est liée au bassin par une liaison rotule et chaque genou est représenté par une liaison pivot. Nous obtenons ainsi un système à 11 degrés de liberté pour la chaîne cinématique présentée en Figure 3.5(b).

3.2.1 Degrés de liberté d'un squelette humain

Tout comme la modélisation de l'ensemble des os en quelques solides rigides, la modélisation des articulations en liaisons rotule et pivot est une vision très simplifiée de la réalité biomécanique du corps humain (voir Figure 3.6). Mais la question est de savoir si, dans notre cadre d'animation cinématique, cette simplification n'est pas suffisante. Un élément de réponse sera apporté en section 4.5, où nous étudierons l'influence des choix sur la cinématique du mouvement.

Nous pouvons noter toutefois l'existence de méthodes d'estimation de complexes articulaires à des fins de simulation et d'animation d'humains virtuels. Gillard [Gil97] utilise par exemple des données biomédicales 3D et Savenko [Sav02] se base sur des expérimentations biomécaniques.

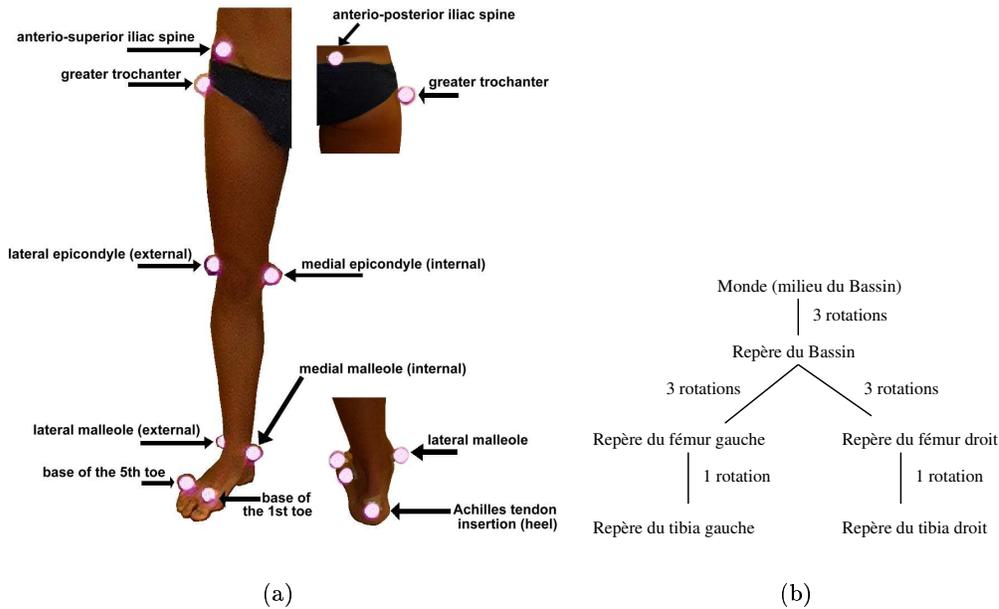


FIG. 3.5 – Les marqueurs présents en Figure (a) sont utilisés pour définir la chaîne cinématique (b) représentant l’humanoïde.

3.2.2 Déclinaison dans un cadre applicatif

Comme nous le présentons en section 1.2.4, l’un de nos cadres applicatifs est l’évaluation des aptitudes locomotrices d’hominidés fossiles. Or il apparaît clairement que la modélisation du squelette virtuel utilisé a une importance dans le processus de création du mouvement, c’est pourquoi il est normal que les membres du projet ATIP se soient orientés vers l’étude de l’hominidé fossile le plus complet : l’Australopithecus Afarensis Lucy (AL 288-1) (voir Figure 3.7).

En observant ce squelette, deux questions se posent immédiatement :

- Quelle est l’influence des hypothèses nécessaires à la reconstruction du squelette complet sur la locomotion de l’hominidé ?
- Et les modélisations et méthodes de calcul utilisables pour l’humain sont elles acceptables pour un australopithèque ?

Notre adaptation cinématique dimensionnelle permet de répondre parfaitement à la première question. En effet, elle permet de calculer une locomotion plausible pour un ensemble d’hypothèses, y compris morphologiques. Ainsi nous pouvons comparer les différents mouvements obtenus lors de chaque modification des hypothèses morphologiques. En ce qui concerne la deuxième question, nous ne pouvons que supposer que les modélisations et méthodes valables sur un humain le sont également sur un hominidé fossile bien que leurs squelettes comportent de grandes différences (voir Figure 3.8). D’ailleurs de nombreuses recherches dans le domaine de la paléanthropologie montre des différences tant au niveau de la morphologie [War02] que des masses et inerties

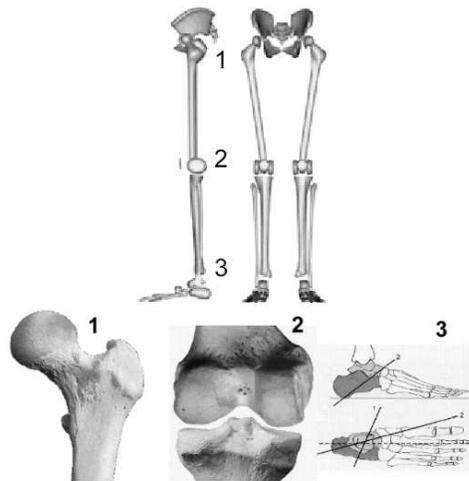


FIG. 3.6 – La complexité des articulations telles que celle du genou ou de la cheville nous oblige à adopter une représentation simplifiée des articulations du corps humain.[Sav02]



FIG. 3.7 – Photographie du squelette de Lucy (AL 288-1) daté d'environ 3,5 Millions d'années. Bien que très partiel, l'ensemble des os retrouvés constitue le squelette d'australopithèque le plus complet découvert à ce jour. (Courtoisie de Gilles Berillon CNRS/UPR 2147)

[KE99], des déplacements du centre de masse [TAT93] ou encore de la dépense énergétique [Kra99].

Nous pouvons nous faire une idée de ces différences morphologiques en observant les paramètres segmentaires d'une jeune femme moderne, modèle anatomique actuel le plus proche, et ceux de Lucy en utilisant soit les tables anthropométriques de l'humain soit celles du chimpanzé (Table 3.1).

À partir des données du squelette de Lucy, le laboratoire CNRS de la Dynamique de l'Évolution Humaine, laboratoire moteur du projet, a réalisé un modèle 3D de la partie inférieure du squelette de Lucy. Cette modélisation est issue d'une numérisation par scannérisation 3D du squelette original conservé en Éthiopie (voir Figure 3.9). Marchal et Berillon [MB01] ont alors défini un protocole de reconstruction et de réarticulation virtuelle à partir de ces données. Leurs hypothèses de reconstruction et de réarticulation

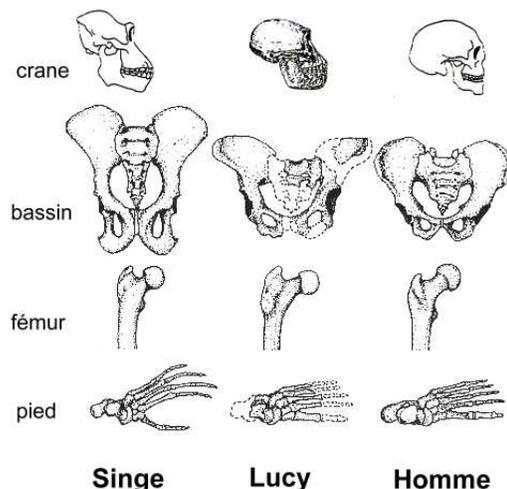


FIG. 3.8 – Les différences morphologiques entre l’humain, le singe et l’australopithèque montre la difficulté d’utiliser des modélisations génériques inter-espèces.

	femme moderne			Lucy (Homme)			Lucy (Chimp.)		
	L	M	Mr	L	M	Mr	L	M	Mr
Pied	0.110	0.84	1.4	0.080	0.46	1.4	0.080	0.56	1.7
Tibia	0.390	3.00	5.0	0.265	1.65	5.0	0.265	0.89	2.7
Cuisse	0.373	6.00	10.0	0.252	3.30	10.0	0.252	2.24	6.8

TAB. 3.1 – Paramètres segmentaires comparés entre une femme moderne et Lucy [KE99]. L étant la longueur du segment en mètre, M sa masse en kg et Mr sa masse relative en % de la masse totale.

ainsi que des hypothèses locomotrices globales font partie de nos paramètres d’adaptation.

Les points caractéristiques décrivant le modèle 3D final ont été définis avec un objectif de généricité inter-espèce c’est-à-dire qu’ils soient à la fois palpables sur un humain vivant et repérables sur un os fossile. Notre protocole d’acquisition de locomotion est défini par ces points caractéristiques.

3.3 Principe d’interpolation

3.3.1 Caractéristiques morphologiques et locomotrices

Chaque personne capturée a effectuée 3 types de locomotion balayant au mieux les possibilités d’évolution des paramètres de l’adaptation suivants.

– La morphologie.

Les sujets ont été choisis de façon à obtenir une grande diversité de la base de

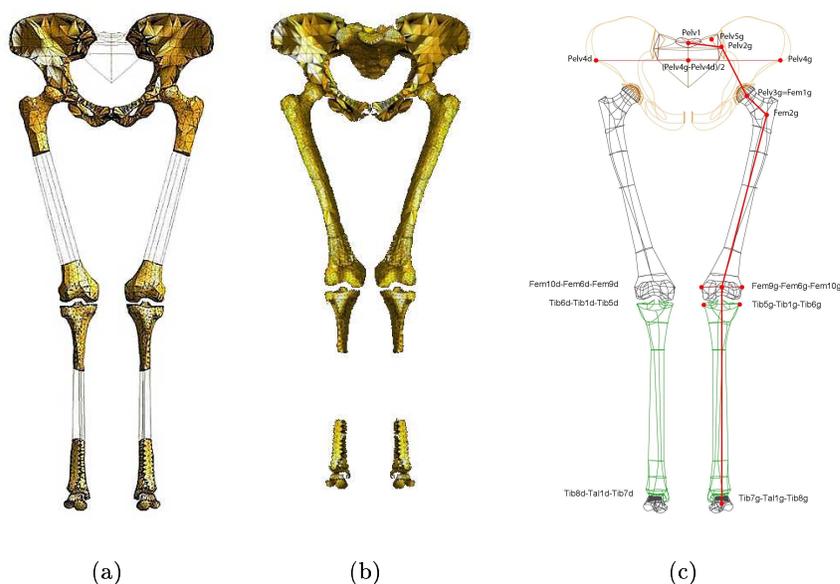


FIG. 3.9 – Le modèle fourni par les paléanthropologues est traité superficiellement, découpé en solides rigides et symétrisé au maximum compte tenu des données originales (a). Des hypothèses sont ensuite introduites sur la réarticulation de ces corps (b) [MB01]. Le modèle 3D complet obtenu est utilisé comme source de données anatomiques pour le module d'adaptation (c).

donnée (voir Table 3.2) tant au niveau des longueurs que des proportions des membres. La base de données contient ainsi les locomotions de 41 personnes.

Sujet	femme	femme	enfant	homme	homme
	1	2		1	2
Fémur (cm)	45.2	46.9	20.3	41.9	50.6
Tibia (cm)	40.4	39.7	18.3	43.7	46.6
Ratio fémur/tibia	1.12	1.18	1.11	0.96	1.09
Jambe (cm)	85.59	86.6	38.6	85.6	97.2

TAB. 3.2 – Longueurs de membres de 5 sujets représentatifs de la base de données : deux femmes (165 cm et 170 cm), un enfant de 2 ans (78 cm) et deux hommes (165 cm et 190 cm).

– **La posture, la longueur de pas et l'écartement des pieds.**

Nous avons demandé aux sujets de marcher de 3 façons différentes. La première est une façon normale c'est-à-dire une locomotion quotidienne. Pour la seconde, nous leur avons demandé de marcher "*comme un singe*", la démarche générale-

ment constatée montre un grand fléchissement des jambes, une longueur de pas plus grande, des rotations internes/externes plus importantes ainsi qu'un large écartement des pieds d'appui. La troisième doit être une locomotion intermédiaire entre marche érigée et fléchie, celle qui pourrait correspondre le mieux à un australopithèque dont la bipédie est récente. Des études en paléoanthropologie [GZL00, War02] ont montrées que ce panel de démarches (voir Figure 3.10) peut être utilisé pour couvrir l'ensemble des hypothèses concernant les postures des hominidés fossiles. L'utilisation de ce panel de démarche sur des mouvements autres que des hominidés fossiles peut porter à discussion, mais ces mouvements ayant été capturés sur des hommes modernes, les mouvements de la base de données sont valides pour ceux ci.

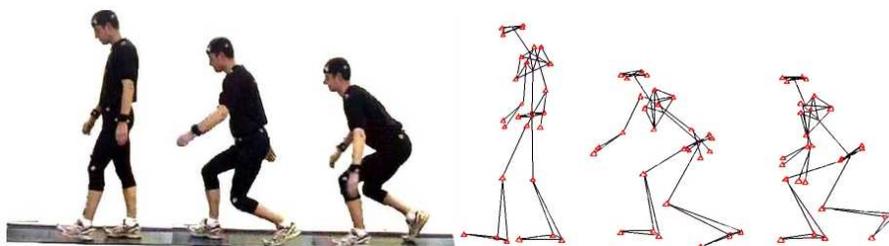


FIG. 3.10 – Ces trois postures, et leurs visualisations 3D, permettent de couvrir les hypothèses des paléoanthropologues sur la démarche de Lucy.

3.3.2 Algorithme d'interpolation

L'idée fondamentale de l'algorithme est de séparer l'interpolation sur les trois axes anatomiques et de l'appliquer sur chaque paramètre influent. Notons ces axes ainsi :

- L'axe \vec{x} représente la direction de déplacement, positivement vers l'avant, il est orthogonal au plan frontal. Le paramètre influent de la méthode d'adaptation sur cet axe est la longueur de pas (voir Figure 3.11(a)). Cela se traduit, pour un élément de la base de donnée, par la distance entre le point 2 et le point 4 de la poulaine, distance au sol entre le levé de talon et le posé d'orteil (voir Figure 3.3).
- L'axe \vec{y} représente le déplacement latéral, il est orthogonal au plan transversal. Le paramètre utilisé dans l'interpolation sur cet axe est l'écartement des pieds (voir Figure 3.11(b)). Pour modéliser ce paramètre, nous utilisons la composante latérale du point 3.
- L'axe \vec{z} représente le mouvement vertical, il est orthogonal au plan sagittal. Le paramètre adapté par l'interpolation sur cet axe est la posture. Pour des raisons d'équilibre [Whi91] ce paramètre peut représenter l'influence verticale, elle est modélisée par la composante verticale de la poulaine à la position de repos (Point 3) (voir Figure 3.11(c)).

Nous effectuons en premier lieu une mise à l'échelle de la base de donnée en utilisant la longueur de jambe du squelette cible. Cette mise à l'échelle, c'est-à-dire cette normalisation du mouvement par le squelette, garanti l'adaptation des mouvements acquis

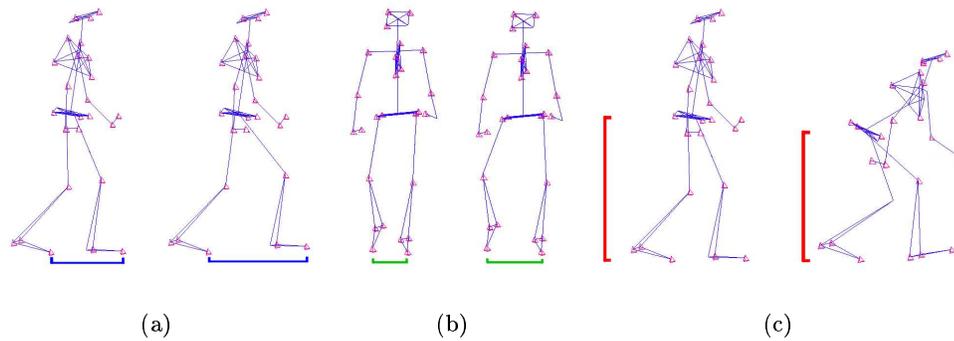


FIG. 3.11 – Les paramètres que nous utilisons pour effectuer l'interpolation dimensionnelle sont la longueur de pas (a), l'écartement des pieds (b) et la posture (c).

à la morphologie du squelette cible comme il est proposé dans des travaux précédents [Gle98, SC02].

Pour chacun des trois paramètres de l'interpolation, l'algorithme recherche dans la base de données l'élément le plus proche de celui voulu. Nous obtenons donc trois poulaines (au maximum), une pour chaque paramètre. Une interpolation linéaire est alors appliquée sur les composantes concernées des points caractéristiques (en positions et tangentes) pour faire correspondre les contraintes. La poulaine résultante est composée des composantes des points caractéristiques issues des trois dimensions correspondant aux trois paramètres précédemment décrits. Notons que le respect des contraintes sur les axes \vec{x} et \vec{y} équivaut à une contrainte spatio-temporelle de respect d'empreintes au sol.

3.3.3 Utilisation d'un profil de vitesse

Notre interpolation est faite sur les coordonnées et tangentes des quatre points caractéristiques. Celles-ci étant sélectionnées en fonction des contraintes, nous utilisons potentiellement plusieurs poulaines afin de calculer la poulaine adaptée. Les différentes poulaines sources ayant des vitesses différentes, ce traitement nous impose de gérer séparément la dimension temporelle. C'est pourquoi, nous utilisons un profil de vitesse moyen pour contrôler cette dimension temporelle, et donc la vitesse de déplacement sur la poulaine.

Nous calculons les profils de vitesse $PV_{i=1,\dots,N}$ de toutes les locomotions de la base de données en utilisant la fréquence d'échantillonnage du système de capture. Puis nous normalisons ces profils suivant deux critères :

- Comme deux personnes n'effectuent pas un cycle dans le même temps t_{cycle} , les profils sont normalisés par cette valeur.
- Étant donné qu'elles n'ont également pas la même longueur de jambe, le pied ne parcourt pas la même distance d_{pas} .

Le profil moyen obtenu est modélisé par une fonction polynomiale. La Figure 3.12 montre ce profil moyen et l'interpolation polynomiale d'ordre 22 qui le caractérise. Elle

nous permet de représenter la courbe avec une erreur moyenne inférieure à 1,29%. L'ordre du polynôme est celui qui donne l'erreur moyenne minimale dans un intervalle de recherche compris dans l'intervalle $[1, 30]$. L'erreur moyenne entre ce profil et tous les profils réels de la base de données est d'environ 20%. Cette erreur étant non négligeable, nous planifions de calculer des profils moyens spécifiques aux quatre sous-courbes, c'est-à-dire à quatre phases du cycle, et aux différents styles de locomotions. À chaque pas de temps, le profil nous donne la valeur de l'abscisse curviligne de la poulaine (pour plus de détail voir l'Annexe B).

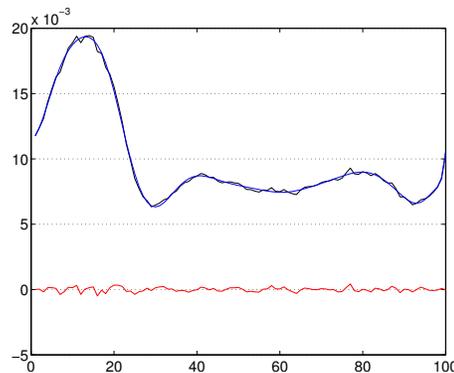


FIG. 3.12 – Le profil de vitesse moyen (en noir) est modélisé par un polynôme de degré 22 (en bleu) avec une erreur (en rouge) moyenne inférieure à 1,29%.

Nous déterminons alors la valeur du paramètre des courbes cubiques nous permettant de calculer à chaque pas de temps la position de la cheville sur la trajectoire.

3.4 Post-traitements

La méthode d'interpolation présentée produit ainsi une trajectoire d'effecteur temporalisée. Cette modélisation du mouvement ne peut pas, tel quel, être affichée par un module de visualisation. L'application de post-traitements doit faire le lien entre cette modélisation et l'animation finale du mouvement. Pour l'animation, nous avons choisi une représentation angulaire des articulations du système (section 3.4.2) tout en calculant le déplacement global de l'humanoïde (section 3.4.3). Mais la première étape est de synchroniser les effecteurs gauche et droit.

3.4.1 Synchronisation latérale

Afin d'alléger les calculs d'interpolation, la base de données contient les trajectoires d'un seul côté (arbitrairement le côté droit). L'autre côté doit être maintenant calculé (voir Figure 3.13).

Étant donné que le profil de vitesse n'est pas constant, nous ne pouvons pas juste décaler les deux profils de $0.5 \times t_{cycle}$, où t_{cycle} serait la durée d'un cycle. Pour améliorer

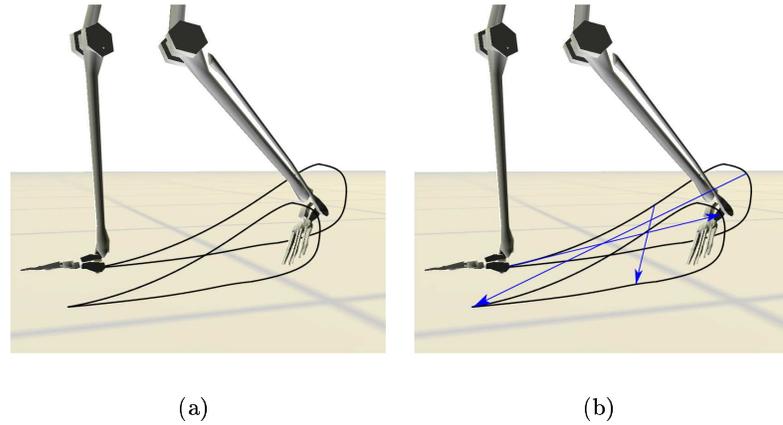


FIG. 3.13 – Les poulaines gauche et droite sont symétrisées (a). Le calcul de l'écart temporel, autrement dit la mise en correspondance des positions respectives dans le temps sur les deux poulaines (b) donne alors deux poulaines synchronisées.

l'animation finale, nous devons trouver le décalage entre les deux trajectoires qui respecte au mieux la contrainte d'appui au sol (non pénétration et non glissement). Nous présentons ici deux méthodes de calcul complémentaires de l'écart temporel entre deux poulaines gauche et droite.

– **Par minimisation des différences verticales.**

Cette méthode de recherche fonctionne sur des locomotions possédant une phase de double support. Elle est basée sur une propriété simple : lorsque les deux pieds touchent le sol, les altitudes respectives sont égales (si on suppose le sol plat). Nous allons donc rechercher le décalage temporel Δ_t qui minimise la différence entre z_{d_t} et $z_{g_{t+\Delta_t}}$ où z_d et z_g sont respectivement les composantes verticales des effecteurs droit et gauche aux instants t et $t + \Delta_t$. Nous effectuons cette recherche dans la partie englobant l'hypothèse de double support (voir Figure 3.14(a)).

L'algorithme calculant le décalage temporel $\Delta_{t_{min}}$ produisant l'écart minimum $\Delta_{z_{min}}$ entre $z_{g_{t+\Delta_t}}$ et z_{d_t} est le suivant (voir Figure 3.14(b)) :

```

POUR le point  $p_{d_t}$  de  $t = temps(Point2)$  à  $t = temps(Point3)$  FAIRE
   $p_{g_t} = Point\_opposé(p_{d_t})$  ;
   $\Delta_t = Delta\_temporel(p_{d_t}, p_{g_t})$  ;
   $p_{g_{t+\Delta_t}} = Déplacement\_temporel(p_{g_t}, \Delta_t)$  ;
   $\Delta_z = |z_{g_{t+\Delta_t}} - z_{d_t}|$  ;
  SI  $\inf(\Delta_z, \Delta_{z_{min}})$  ALORS
     $\Delta_{z_{min}} = \Delta_z$  ;
     $\Delta_{t_{min}} = \Delta_t$  ;
  FIN SI
FAIT

```

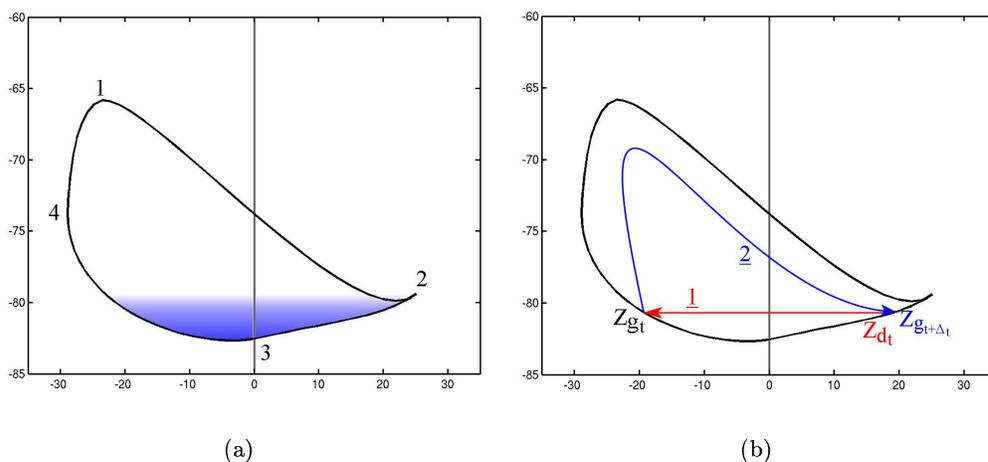


FIG. 3.14 – Nous limitons l'intervalle de travail à la phase d'appui au sol (a), l'algorithme par minimisation des différences verticales se base sur les composantes en \vec{z} d'un point initial z_{d_t} , de son point latéralement opposé z_{g_t} et de l'opposé de ce dernier $z_{g_t+\Delta_t}$ (b).

Où `Point_opposé` calcule le point d'altitude le plus proche sur la poulaine opposée.

– **Par minimisation des frottements au sol.**

Une autre méthode pour calculer le Δ_t entre les deux poulaines est de trouver le décalage qui minimise les frottements au sol. Ces frottements peuvent être estimés en regardant l'évolution comparée des composantes en \vec{x} des poulaines gauche et droite. En effet, lors d'une locomotion bipède normale, les deux effecteurs inférieurs ne peuvent avancer dans la même direction en même temps. L'algorithme calculant le décalage temporel $\Delta_{t_{min}}$ qui minimise ces frottements est le suivant :

```

POUR  $\Delta_t$  de 0 à duree(cycle) FAIRE
  POUR  $p_t$  de  $t = \text{temps}(\text{Point2})$  à  $t = \text{temps}(\text{Point4})$  FAIRE
     $Nb = Nb + \text{Nombre\_frottements}(p_t, p_{t-1})$  ;
  FAIT
  SI  $\text{inf}(Nb, Nb_{min})$  ALORS
     $Nb_{min} = Nb$  ;
     $\Delta_{t_{min}} = \Delta_t$  ;
  FIN SI
FAIT

```

Où `Nombre_frottements` est la fonction qui compte le nombre de fois où les composantes \vec{x} des positions gauche et droite évoluent dans le même sens.

Ces deux approches sont complémentaires. En effet, en cas de nombreuses éga-

lités dans le second algorithme, le premier peut être appliqué sur l'ensemble des solutions obtenues. De même nous pouvons exécuter ces deux algorithmes avec une fonction `inf` dépendante des résultats de l'autre méthode.

3.4.2 Calcul des postures par cinématique inverse

Pour calculer l'animation finale, il faut, à partir des poulaines qui sont les trajectoires des effecteurs du système hiérarchique du squelette, calculer les trajectoires articulaires de ce système. C'est exactement la formulation du problème de cinématique inverse présentée en section 2.3.1. La position X de chaque cheville est donnée par $X = f(\theta)$ où θ est l'ensemble des angles aux articulations parentes. Ce qui nous intéresse ici est le problème inverse, c'est-à-dire obtenir les θ correspondant à une position X de chaque cheville : $\theta = f^{-1}(X)$. La méthode que nous utilisons, exposée dans l'état de l'art en section 2.3.1, est la méthode de linéarisation locale. En calculant d'abord la Jacobienne du système nous obtenons la relation :

$$\Delta X = J(\theta)\Delta\theta \quad (3.1)$$

Partant des poulaines et d'une posture initiale, le problème est de calculer des trajectoires angulaires réalistes. La tâche principale est assurée en inversant l'équation précédente. Quand la tâche principale est résolue nous obtenons les valeurs initiales $\Delta\theta_m$:

$$\Delta\theta_m = J^+(\theta)\Delta X \quad (3.2)$$

où J^+ est la pseudo-inverse de J . La solution à cette équation a une norme minimale mais n'assure en rien le respect des butées articulaires et donc produit des trajectoires non réalistes. À cette fin, nous utilisons une tâche secondaire proposée par Nicolas et coll. [NMB04] pour prendre en compte ces contraintes :

$$\Delta\theta = J^+(\theta)\Delta X + (I - J^+J)\delta \quad (3.3)$$

où δ est le paramètre à optimiser et I est la matrice diagonale unitaire. δ correspond à la variation d'angle qui est partiellement réalisé par la projection dans l'espace nul de la transformation linéaire J . La seconde partie de l'équation ne modifie pas le respect de la tâche principale, et ceci pour n'importe quelle valeur de δ . Afin de contrôler le mouvement et de calculer des trajectoires articulaires réalistes, δ vérifie trois contraintes :

- (C1) Définition d'une fonction de coût continue et dérivable qui croît rapidement aux butées articulaires, grâce à deux fonctions exponentielles (voir Figure 3.15) :

$$f_1(\theta_t, \Delta\theta_m, \delta) = \sum_{i=1}^{11} (e^{\xi(\alpha_i - bSup_i)} + e^{\xi(bInf_i - \alpha_i)}) \quad (3.4)$$

avec $\alpha = \theta_t + \Delta\theta_m + (I - J^+J)\delta$

où θ_t est l'état courant, $bSup_i$ et $bInf_i$ sont respectivement les butées articulaires supérieures et inférieures du i^{eme} degré de liberté θ_i . ξ est un coefficient constant qui assure une augmentation rapide de la fonction lorsque l'angle franchi les seuils des butées.

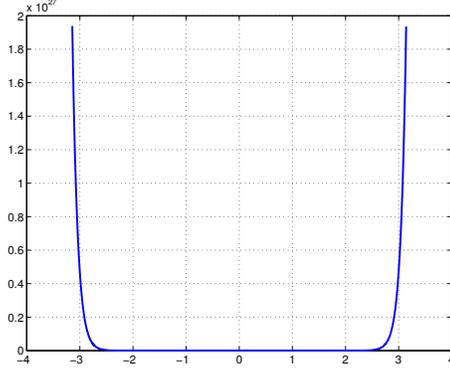


FIG. 3.15 – Fonction de coût des butées articulaires sous forme d’une double exponentielle pour des butées de $-\pi$ et $+\pi$.

- (C2) Minimisation de l’énergie cinétique de rotation de chaque segment s du corps :

$$f_2(\theta_t, \Delta\theta_m, \delta) = \sum_{s=1}^5 \frac{1}{2} R_s I_s R_s^T (w_s((I - J^+ J)\delta, \Delta\theta_m))^2 \quad (3.5)$$

où I_s est la matrice d’inertie du segment s , w_s est une fonction qui calcule le vecteur d’accélération angulaire du segment dépendant de $\Delta\theta_m$ et du paramètre δ . R_s est la matrice de transformation entre le repère local au segment et le repère du monde.

- (C3) Recherche d’une solution proche de la posture de repos :

$$f_3(\theta_t, \Delta\theta_m, \delta) = \|\theta_t + \Delta\theta_m + (I - J^+ J)\delta - \theta_r\|^2 \quad (3.6)$$

où θ_r représente la posture de repos.

La méthode de Multidirectional Search (MDS) [Tor89] a été utilisée pour résoudre ces tâches secondaires. Elle permet la minimisation de fonctions dérivables ou non et est peu sensible aux minima locaux. La fonction globale z à optimiser est $z = f_1 + f_2 + f_3$.

Afin d’évaluer également ces trois tâches secondaires, Nicolas et coll. [NMB04] proposent d’utiliser conjointement trois critères biomécaniques :

- Le Jerk total, dérivée troisième par rapport au temps des vecteurs angulaires, pour toute les séquences résultantes. Plusieurs études en biomécanique [LJT⁺00] ont démontrées son importance dans les mouvements humains naturels :

$$C_1 = \frac{1}{11} \sum_{i=1}^{11} \frac{d^3}{dt^3} \theta^2(i) \quad (3.7)$$

- La variation entre les vecteurs d’état au premier et au dernier pas de temps afin d’évaluer si le mouvement est cyclique :

$$C_2 = \|\theta(\text{debut}) - \theta(\text{fin})\| \quad (3.8)$$

- Le travail interne calculé par une méthode indirecte respectant le théorème d'énergie cinétique :

$$W_{int} = |\Delta[E_c] - mg\Delta h| \quad (3.9)$$

Cette méthode est couramment utilisée en biomécanique [BSS83]. E_c est définie comme la somme des énergies cinétiques de translation et de rotation de chaque segment. La puissance interne par unité de masse est alors définie par :

$$C_3 = \frac{1}{mT} \sum_{t=1}^T W_{int}(t) \quad (3.10)$$

L'évaluation de ces critères et son impact sur les mouvements ont été présentés par Nicolas et coll. [NMB04].

3.4.3 Préparation à l'animation

L'application de ce solveur de cinématique inverse sur les poulaines adaptées fournit les trajectoires articulaires du bassin, des hanches et des genoux. Le mouvement obtenu est un mouvement relatif à la position de la racine du squelette. Pour animer le mouvement complet final, nous devons encore calculer le vecteur d'angle de la cheville, appliquer le mouvement de translation de la racine et celui du haut du corps.

Construction du pied et de l'angle de la cheville

Les dimensions du pied sont calculées à partir de valeurs moyennes contenues dans des tables anthropométriques [DeL96]. Le calcul de l'angle de la cheville se base sur des propriétés basiques d'un mouvement de locomotion. L'algorithme suivant permet de calculer des trajectoires angulaires plausibles aux chevilles :

```
POUR t de 0 à duree(cycle) FAIRE
   $Z_{sol} = \min(Z_{chevilleGauche}, Z_{chevilleDroite})$  ;
  POUR cote de gauche à droite FAIRE
     $\text{Positionnement}(cote, 90^\circ)$  ;
    SI  $\inf(Z_{cote}, Z_{sol})$  ALORS  $\text{Correction}()$  ;
  FAIT
FAIT
```

Où Positionnement effectue une rotation suivant l'axe pivot parallèle à celui du genou passant par la cheville, et Correction effectue une rotation suivant ce même axe afin de "*remonter*" le pied sur le sol (voir Figure 3.16).

Les trajectoires angulaires obtenues, après lissage par splines (voir Figure 3.17), sont comparables à des données de la littérature en biomécanique [Whi91].

Passage en mouvement absolu

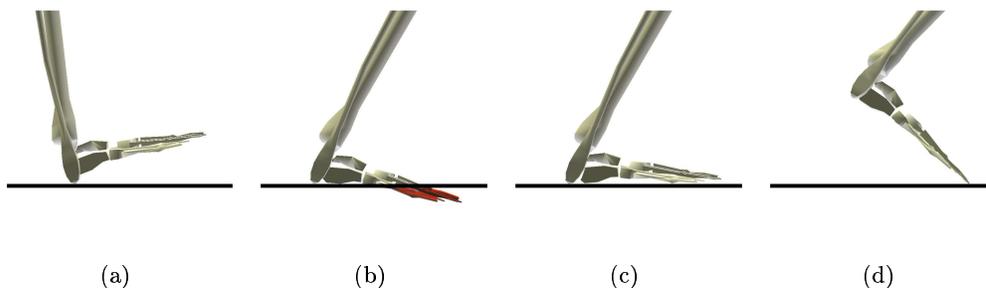


FIG. 3.16 – Les différents cas de reconstruction de l'angle de la cheville. Entre le contact du talon et le premier appui plat du pied, l'angle n'est pas modifié (a). Durant toute la phase d'appui de l'orteil, l'angle est corrigé par une rotation de la cheville en cas de pénétration dans le sol (b,c,d).

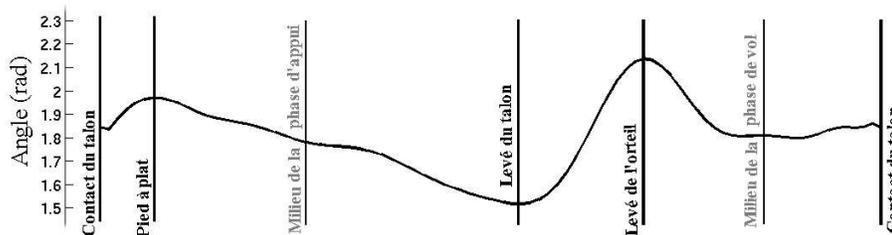


FIG. 3.17 – Angle simulé de la cheville droite.

Pour retrouver le déplacement global de l'humanoïde, nous nous basons sur ses appuis au sol. En effet, nous avons les trajectoires des ses points d'appui au sol, son déplacement suivant les deux axes (\vec{x}, \vec{y}) est donc le mouvement permettant le minimum de glissements de ces points d'appui, l'altitude étant gérée par leurs composantes verticales \vec{z} . Cette méthode peut être affinée par des traitements plus complexes proposés, par exemple, par Kovar et coll. [KGS02] et Ikemoto et coll. [IAF06].

Mouvement du haut du corps

Le mouvement du haut du corps peut être calculé de différentes manières. Multon [Mul98], par exemple, utilise une modélisation des segments supérieurs par un pendule inverse dont les effets dûs aux forces externes (poids, déplacements du bassin,...) sont inversés. Dans notre approche, nous appliquons un mouvement moyen synchronisé et mis à l'échelle par les longueurs des membres. Mais nous indiquons ici une autre méthode intéressante de part sa similarité à notre méthode de modélisation et d'adaptation.

En exprimant le vecteur position d'une main dans le repère de l'épaule, nous pouvons construire l'équivalent d'une "*poulaine des mains*" (voir Figure 3.18). Cette poulaine possède également des points caractéristiques et pourrait être modélisée et adaptée suivant des paramètres tels que l'amplitude de balancement des bras, de même qu'un

algorithme de cinématique inverse peut aisément calculer les angles intermédiaires. Nous pourrions donc a priori appliquer notre principe d'adaptation sur ce type de segments.

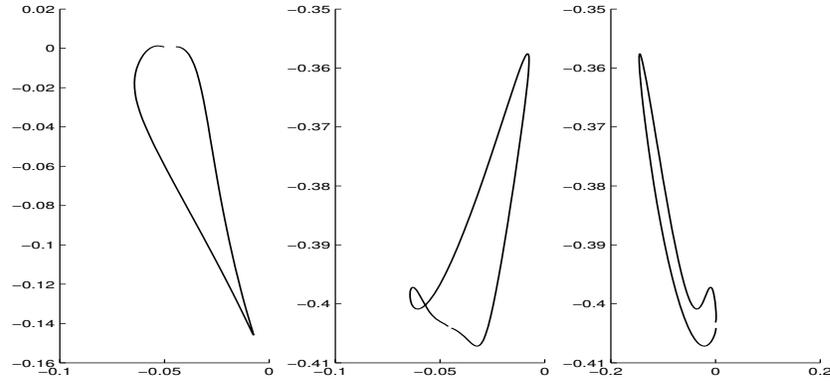


FIG. 3.18 – Le mouvement du haut du corps peut être interpolé grâce à des "poulaines de mains". Vues de dessus, de face et de côté de la trajectoire de la main dans le repère de l'épaule.

3.5 Résultats

Dans cette section, nous présentons la méthode qui nous a permis de valider notre approche, puis des résultats de simulations effectuées à partir de données paléanthropologiques.

3.5.1 Validation de l'interpolation

La première étape dans le processus de validation est une validation d'autocoherence de l'interpolation. Nous calculons une locomotion avec des paramètres d'interpolation inclus dans la base de données. La première étape consiste à laisser la poulaine originale dans la base de donnée et à constater si on retrouve une trajectoire identique. Nous comparons donc la poulaine obtenue avec la poulaine originale capturée. Cette comparaison est effectuée pour tous les paramètres que se soit en terme de forme ou de vitesse. La Figure 3.19 montre une de ces comparaisons. Les légères différences constatées sont dues à l'erreur induite par la modélisation générique en courbes cubiques. Cette validation a été effectuée pour toutes les locomotions capturées et montrent des résultats similaires. Afin de quantifier cette erreur, nous mesurons la différence entre ces poulaines par une erreur RMS (Root Mean Square) d'ordre 2, mesure adaptée à la comparaison de trajectoires proches.

$$e_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Capture(t_i) - Adaptation(t_i))^2} \quad (3.11)$$

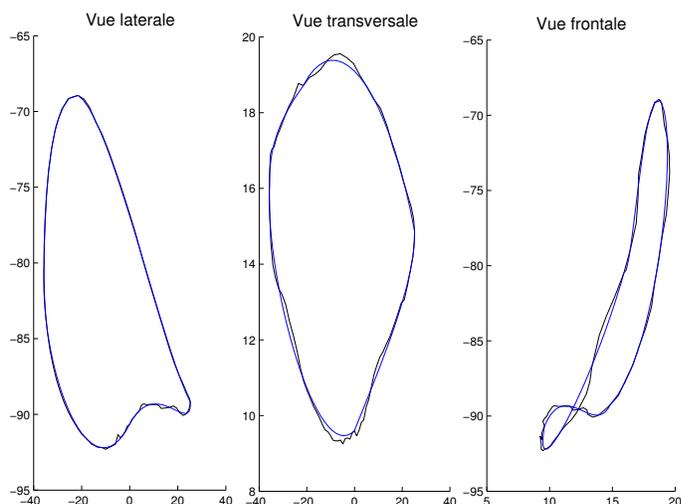


FIG. 3.19 – La poulaine capturée (noire) et adaptée (bleue) en vue latérale, transversale et frontale. Unité en centimètre.

où t_i représente le temps discret et N le nombre de pas de temps. Nous calculons cette erreur pour chaque axe (x, y, z) séparément puis leur moyenne. Pour notre exemple de la Figure 3.19 les erreurs RMS sont :

	axe x	axe y	axe z	moyenne
e_{RMS} (cm)	3.65	0.70	1.48	1.94

Cette évaluation est effectuée pour tous les mouvements, les valeurs moyennes et leurs écarts types (S.D.) pour toute la base sont :

	axe x	axe y	axe z	moyenne
e_{RMS} (cm)	2.74	1.22	1.24	1.73
S.D. (cm)	1.18	1.12	0.76	0.82

Nous pouvons noter que la plus grande erreur moyenne ne dépasse pas les 3 cm et que la dispersion est également faible.

Cet ordre de grandeur est identique à celui obtenu lorsque l'on retire la poulaine originale de la base de donnée. Ceci confirme la validation de notre approche d'interpolation cinématique.

3.5.2 Validation de l'adaptation

Dans cette section, nous discutons des trajectoires angulaires obtenues en comparaison à celles classiquement décrites dans la littérature. Nous validons notre modèle en comparant les angles simulés et les angles réels de 7 sujets.

Observons, en Figure 3.20, les angles obtenus pour le troisième sujet suivant les repères anatomiques classiques représentés en Figure 3.21. L'inclinaison du bassin est quasi constante autour de 0,05 rad. Son obliquité est pratiquement symétrique et est

comprise entre $-0,09$ et $0,03$ rad, tout comme les rotations internes/externes (entre $-0,1$ et 0 rad). Toutes ces valeurs signifient que le bassin ne tourne presque pas pendant le cycle de locomotion. Nous constatons qu'en général, les rotations du bassin grandissent avec la longueur de pas.

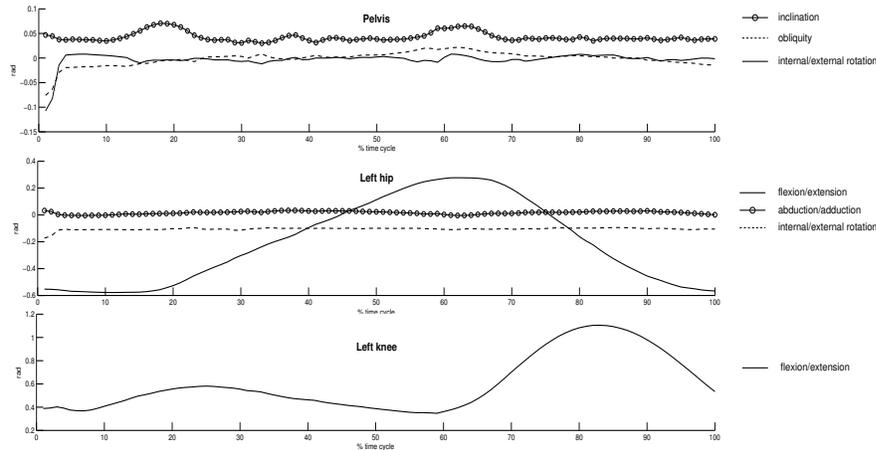


FIG. 3.20 – Angles simulés pour le sujet 3.

En étudiant les angles aux hanches, nous pouvons observer une phase de flexion (à $-0,58$ rad) et une phase d'extension (à $0,32$ rad). Les rotations en abduction/adduction et interne/externe sont constamment proches de 0 rad, ce qui signifie que le mouvement est principalement effectué dans le plan sagittal. Nous observons également une courbe bimodale pour la trajectoire angulaire du genou. Le premier pic correspond au posé du talon au sol, et la seconde partie de la courbe correspond à la phase de vol. Cela s'effectue dans l'intervalle entre $0,35$ et $1,15$ rad ce qui est en corrélation avec de précédents travaux en biomécanique. Pour finir, tous les angles calculés par l'adaptation respectent les choix des butées articulaires.

De plus, nous pouvons profiter du fait que nous avons les mouvements originaux de ces 7 sujets pour directement comparer les valeurs des trajectoires articulaires. Nous proposons de calculer l'erreur RMS d'ordre 2 pour évaluer la différence entre les trajectoires capturées et simulées. Les résultats obtenus sont présentés en Table 3.3, ils montrent des erreurs plutôt faibles. En effet, ces erreurs sont toujours inférieures à $0,05$ rad.

L'évaluation des trois critères (C_1, C_2, C_3) donnent également des résultats satisfaisants (voir Table 3.4). La valeur moyenne du Jerk ($\bar{C}_1 = 7,2 \cdot 10^7 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-3}$) est compatible avec des travaux précédents sur des sujets marchant à des vitesses similaires [HM93]. Ce qui est également le cas de la puissance interne moyenne par unité de masse ($\bar{C}_3 = 6,1 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$). Cette puissance interne est corrélée avec l'énergie physiologique de la locomotion [BMD03], et peut à l'avenir constituer un critère à minimiser dans la tâche secondaire de cinématique inverse.

La Figure 3.22 compare les angles réels et simulés pour le sujet 5 dans chaque repère anatomique. Étant donné que les erreurs RMS des rotations du bassin ne sont pas

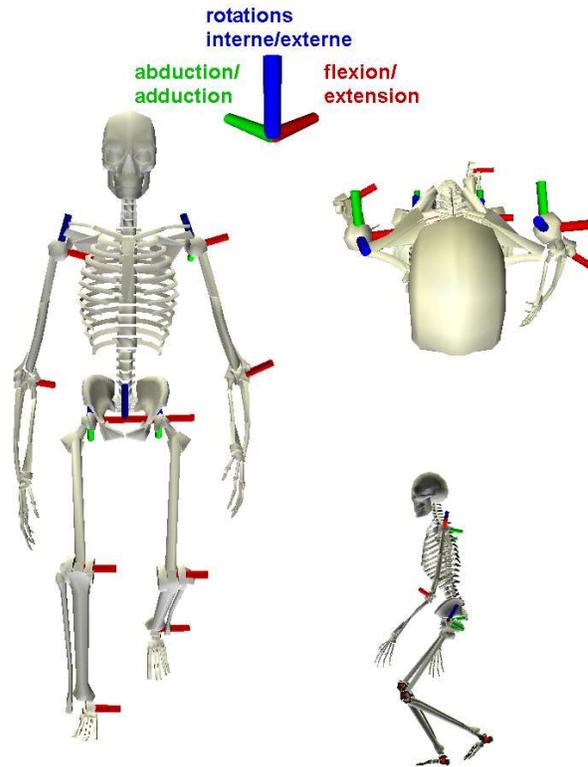


FIG. 3.21 – Repères anatomiques de rotation de l'humanoïde.

	pelv. incl.	pelv. obliq.	pelv. rot. int/ext	han. flex/ext
Moyenne	0.03	0.01	0.01	0.05
± S.D (rad)	0.03	0.01	0.01	0.03
	han. abd/add	han. rot. int/ext	gen. flex/ext	
Moyenne	0.04	0.03	0.02	
± S.D (rad)	0.04	0.01	0.01	

TAB. 3.3 – Erreurs RMS entre les trajectoires angulaires simulées et réelles pour le bassin, la hanche gauche et le genou gauche pour les 7 sujets.

Sujet	1	2	3	4	5	6	7	moyenne
$C_1 \times 10^7 (rad.s^{-3})$	5.2	8.7	3.6	9.2	10.3	5.2	7.9	7.2
$C_2 (rad)$	0.02	0.02	0.01	0.03	0.01	0.02	0.01	0.02
$C_3 (W.kg^{-1})$	5.1	7.2	5.7	7.1	5.6	5.9	6.1	6.1

TAB. 3.4 – Évaluation des critères biomécaniques C_1, C_2, C_3 pour les 7 sujets évalués.

significatives, nous présentons uniquement les trajectoires angulaires de la hanche et du genou gauche. Nous obtenons des résultats similaires pour la hanche et le genou droit.

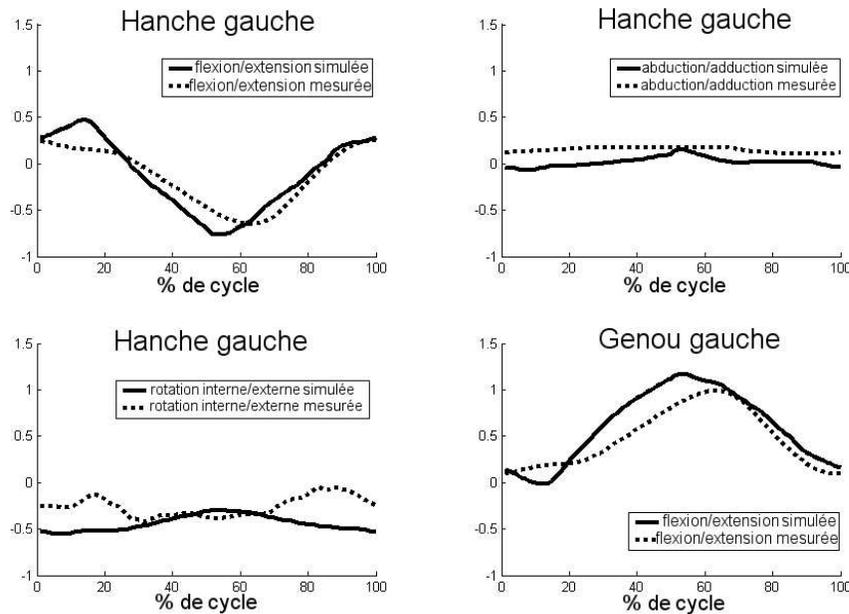


FIG. 3.22 – Angles réels et simulés pour le sujet 5.

3.5.3 Simulations applicatives

La méthode d’adaptation présentée trouve un domaine d’application parfaitement adapté : la paléanthropologie. L’une des grandes questions que les paléanthropologues se posent est de connaître la locomotion d’un bipède dont ils n’ont que les os secs. En utilisant notre méthode d’adaptation, les paléanthropologues peuvent tester certaines hypothèses sur la morphologie et sur la démarche de ces bipèdes. Les paramètres du *retargeting*, de l’interpolation et de la cinématique inverse que les paléanthropologues peuvent testés sont :

- La morphologie, par les distances entre articulations (voir Figure 3.23(a)).
- La posture de repos, par les matrices de passage entre articulations calculées pour une posture donnée (voir Figure 3.23(b)).
- La longueur de pas (voir Figure 3.23(c)) et l’espacement des pieds, définissant ainsi des empreintes au sol à suivre.
- Les butées articulaires.

Pour définir la morphologie, les paléanthropologues du projet ATIP ont virtuellement reconstruit le squelette de Lucy. La posture de repos a été obtenue par des hypothèses de réarticulations des segments [MB01]. En ce qui concernent les empreintes, certaines études de biologistes [LBB91] et d’anthropologues [Del92] se sont particuliè-

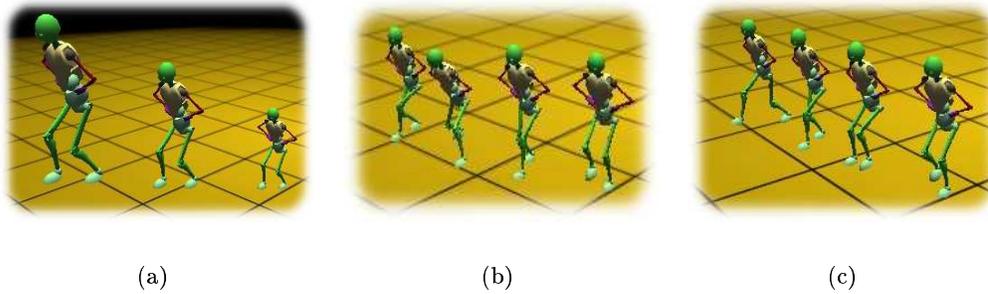


FIG. 3.23 – Extraits de simulations de locomotions adaptées à : (a) la morphologie, (b) la posture et (c) la longueur des pas.

rement intéressées à l'anatomie du pied des premiers hominidés. Les premiers résultats de ces études montrent que les articulations du talon des fossiles ressemblent beaucoup plus à celles de l'Homme que celles du chimpanzé bien que présentant des caractères non humain (appui en varus et abduction de l'hallux). La reconstitution du pied des hominidés anciens conforte les données sur leurs adaptations à la bipédie. Le comportement bipède terrestre des hominidés plio-pléistocènes est établi par les empreintes de pas de Laetoli, datées de 3.6 Millions d'années (voir Figure 3.24).



FIG. 3.24 – Trace de pas de Laetoli, australopithèque pouvant être paléoanthropologiquement considéré comme contemporain à Lucy.

Les butées articulaires du squelette de Lucy peuvent être mesurées sur ses os. Bien entendu, les muscles et tendons qui étaient présents sur son corps modifient ses valeurs. Ce sont ces hypothèses que testent les paléoanthropologues (voir Figure 3.25).

Observons les résultats de la méthode d'adaptation pour un ensemble donné d'hypothèses paléoanthropologiques. Les éléments de la base de données qui ont été sélectionnés et interpolés sont :

- En \vec{x} (longueur de pas) : un homme plus petit que la moyenne marchant avec une posture normale.

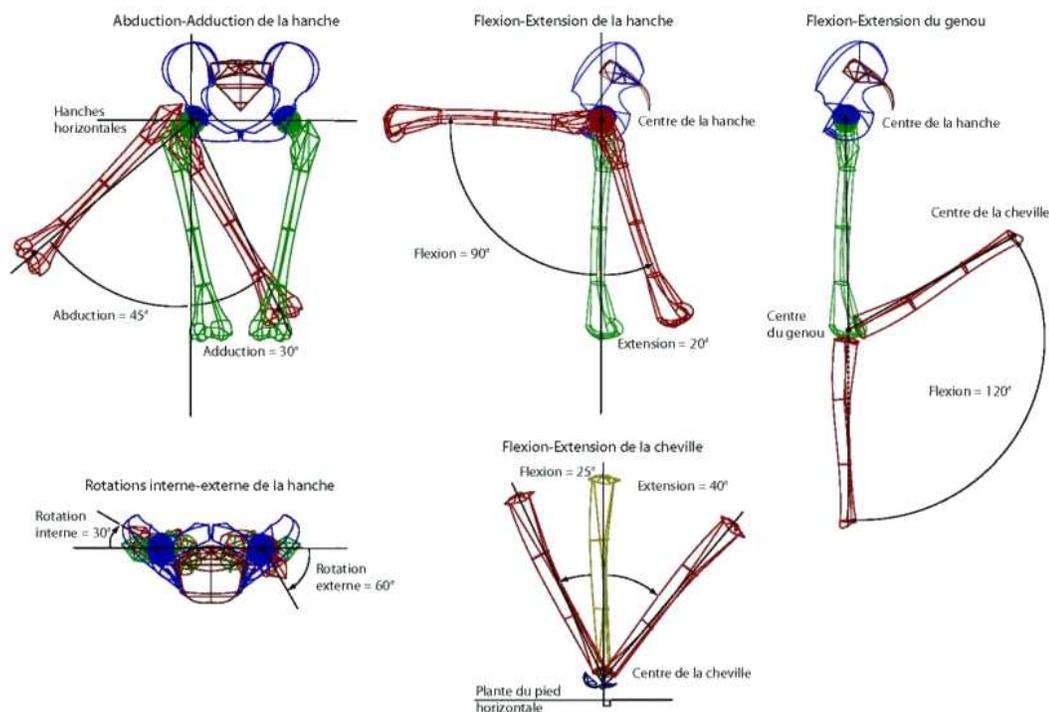


FIG. 3.25 – Amplitudes maximales des articulations inférieures.

- En \vec{y} (écartement des pieds) : un homme de taille moyenne marchant avec une posture intermédiaire.
- En \vec{z} (posture) : une femme de taille moyenne marchant avec une posture fléchie.

Différents sujets et différentes postures ont été sélectionnés pour construire le mouvement final. Cette diversité justifie notre protocole d'acquisitions de locomotions multiples de plusieurs personnes. La posture de Lucy est très discutée dans la littérature paléanthropologique [War02]. Les trois hypothèses de posture bipédique sont une posture érigée, une posture hanche fléchie/genou fléchi, et une posture intermédiaire.

Les choix effectués dans la base de données peuvent alors être interprétés par les spécialistes. Nous pouvons peut être noter ici que la longueur de pas semble assez petite par rapport à la morphologie et que l'écartement des pieds correspond à celui d'une marche intermédiaire. Le mouvement calculé combine les trois différentes poulaines et correspond géométriquement à une posture intermédiaire, entre un humain érigé et un humain fléchi. La Figure 3.26 montre les trajectoires angulaires obtenues pour le bassin (3 ddl), les hanches (3 ddl) et les genoux (1 ddl). Notons que l'inclinaison du bassin est constante par rapport à la posture de repos. Comme pour une locomotion humaine normale, les degrés de liberté soutenant les mouvements les plus importants sont les flexions/extensions des hanches et des genoux.

La Figure 3.27 montre les poulaines gauche et droite adaptées dans les trois plans anatomiques, et la Figure 3.28 montre les diagrammes de phases. Ces résultats sont

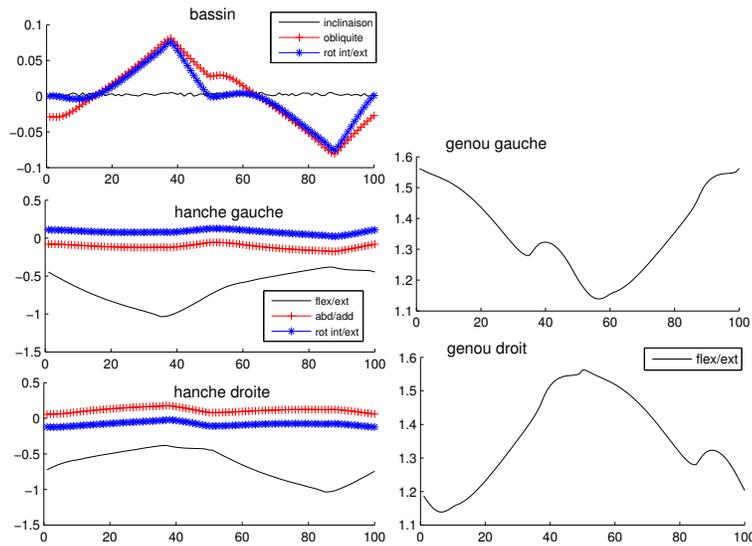


FIG. 3.26 – Trajectoires articulaires (rad) d'une locomotion plausible de Lucy (A.L. 288-1) sur un cycle de locomotion.

compatibles avec de précédentes études paléanthropologiques sur les locomotions bipèdes [GZL00, TAT93]. En particulier avec les résultats de Crompton et coll. [CLW⁺98, CWLG03] qui appliquent les données segmentaires de Lucy à des modèles cinétiques de marches de différentes espèces (humain, chimpanzé, gorille et orang-outan).

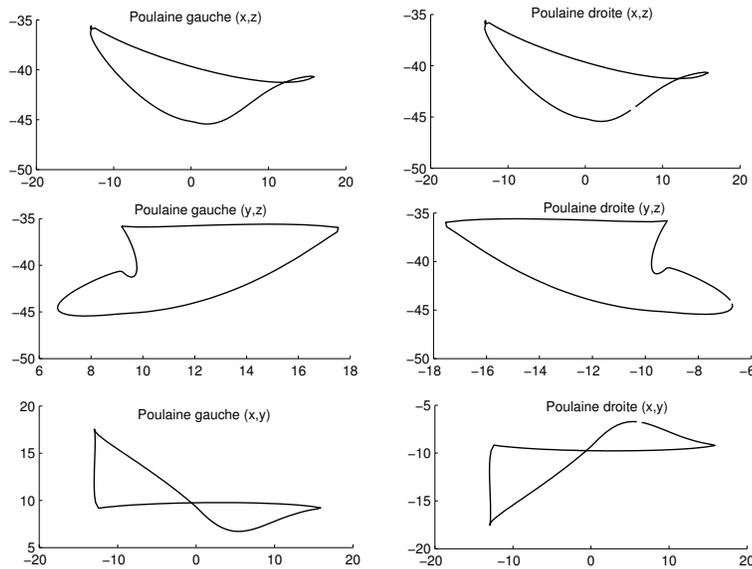


FIG. 3.27 – La poulaine adaptée aux hypothèses paléanthropologiques. Vue latérale (x, z), vue frontale (y, z) et vue transversale (x, y). Unité en centimètre.

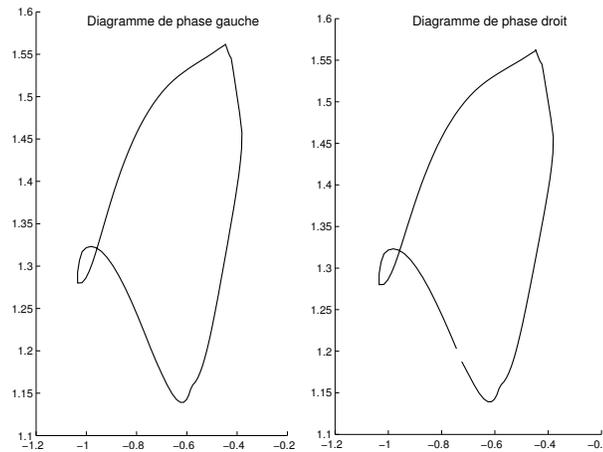


FIG. 3.28 – Diagrammes de phases de la locomotion adaptée. En abscisse l’angle à la hanche et en ordonnée l’angle au genou.

Les algorithmes d’interpolation [PNM05, PDBN06] et la méthode de cinématique inverse [NMB04] présentés dans ce chapitre sont indépendants de l’application visée. C’est pourquoi nous pouvons les utiliser comme éditeurs de nouveaux mouvements dans la suite de notre travail (Chapitre 4). Ces méthodes sont d’ors et déjà utilisés par les paléanthropologues du projet ATIP [BNM⁺05].

3.5.4 Discussions et conclusion

La méthode d’adaptation présentée dans ce chapitre est une alternative aux méthodes de *retargeting* et d’adaptation indiquées dans l’état de l’art. Elle permet de produire des locomotions plausibles en fonction de paramètres morphologiques tels que les longueurs des segments, les masses et inerties, la forme des os (qui modifient la position relative des centres articulaires), ainsi que de types d’articulations, de butées articulaires et de la posture de repos. Les méthodes de *retargeting* proposées dans de précédents travaux se focalisent généralement sur les changements de longueurs des membres en prenant en compte des contraintes géométriques telles que le non glissement des pieds d’appui. Néanmoins, les butées articulaires et les types d’articulations agissent également sur le mouvement. Les techniques faisant intervenir des *frame space interpolations*, du *motion blending* ou bien des analyses statistiques (comme les ACP) ne peuvent en tenir compte car elles supposent généralement que les squelettes manipulés ont des structures très similaires.

Nous nous sommes focalisés, dans ce chapitre, sur des mouvements de locomotions en ligne droite. Nous n’avons pas introduit, par *blending* ou par une méthode d’édition de mouvement, l’adaptation à l’environnement et la génération de locomotion en virage. Le but de ce travail est de calculer une locomotion plausible grâce à des connaissances morphologiques et des règles biomécaniques. Ainsi, afin d’évaluer nos résultats d’adaptation, nous devons les comparer avec les trajectoires réelles sans aucune modifi-

cation additionnelle, sans biais provenant de telles méthodes d'édition. Cependant, des adaptations à l'environnement peuvent être appliquées en tant que post-processus.

Un module de cinématique inverse avec contraintes, priorisées ou non, devrait être capable de gérer des chaînes cinématiques radicalement différentes en imposant des trajectoires à certains points du squelette. Donc, au lieu d'imposer une trajectoire à chaque degré de liberté, cette technique permet la spécification de seulement quelques trajectoires de points (moins que le nombre de degrés de liberté). Plus l'espace de recherche est petit, plus le mouvement imposé par ces quelques points est contraint. En effet, pour la locomotion, le réalisme du mouvement résultant dépend partiellement de la qualité de la trajectoire imposée aux effecteurs qui elle dépend de notre algorithme d'interpolation.

La base de données peut être vue comme une discrétisation de l'espace représentant les possibilités de mouvements des chevilles pendant la locomotion. Notre base de données est composée de 123 locomotions provenant de 41 sujets avec différentes démarches. Plus la base de données est grande et diversifiée, plus les mouvements des effecteurs résultants sont réalistes. S'il n'y pas de mouvements capturés correspondant au type de squelette utilisé pour l'animation (par exemple pour animer un dinosaure ou Lucy, où aucune capture réelle ne peut être faite), le système d'adaptation interpole les mouvements en utilisant les squelettes qui correspondent le plus aux propriétés morphologiques. Mais évidemment, si uniquement des mouvements humains ont été capturés alors que l'on cherche à animer un dinosaure ou même un singe, le résultat peut ne pas être réaliste. Dans nos perspectives, des extrapolations guidées par des propriétés morphologiques pourraient être ajoutées afin de corriger cette limitation.

Dans la méthode de cinématique inverse, la minimisation est effectuée localement, ce qui crée parfois de légères discontinuités dans les angles du bassin. Avec un critère de minimisation de l'énergie, le bassin ne tourne pas tant que les autres angles ne sont pas proches des butées. Cela a pour conséquence l'observation, quand aucune autre solution n'est possible, d'un mouvement bref du bassin. Pour résoudre ce problème, il serait nécessaire d'utiliser une autre méthode basée sur une minimisation globale afin d'anticiper et de prévenir un tel comportement.

Pour conclure sur cette méthode d'adaptation, la comparaison de nos résultats aux données réelles est encourageante et démontre que les hypothèses utilisées sont prometteuses. En étendant cette méthode à d'autres créatures non humaine, voir non bipède, nous devrions être capable d'assurer que pour tout type de créature, il est possible de calculer une locomotion plausible. Ce travail a plusieurs domaines d'applications possibles non limité à l'animation et à la simulation. Par exemple, proposer le calcul d'une locomotion d'un squelette quelconque de bipède a un champ d'application très large, tant en anthropologie qu'en zoologie. En réhabilitation orthopédique il peut être également intéressant de prédire les adaptations locomotrices due à une prothèse qui peut être considérée comme une adaptation morphologique ou bien après rééducation lorsque les butées articulaires et les vitesses angulaires maximales sont affectées.

Chapitre 4

Évaluation de la dynamique

Malgré le critère énergétique C_2 de la tâche secondaire utilisée, les mouvements que nous produisons par adaptation ne sont pas forcément valides physiquement. Or il apparaît qu’obéir aux lois de la physique est un critère important dans la plausibilité des mouvements. C’est d’ailleurs pourquoi la dynamique de la locomotion humaine a été étudiée depuis longtemps à des fins d’animation [VDO99, FDCM97], les adaptations cinématiques et cinétiques (par interpolation, édition, *retargeting* ou *blending*) pouvant potentiellement rendre les mouvements physiquement invalides. Lorsque ces adaptations introduisent des erreurs visuellement apparentes dans la dynamique, des améliorations peuvent être apportées en tant que post-processus ou bien peuvent corriger l’algorithme d’adaptation. À cette fin, Safonova et col. [SH05] ont proposé une méthode d’analyse de l’exactitude physique dans des mouvements linéairement interpolés. Les auteurs proposent dans cette approche une analyse de la conservation, dans des mouvements interpolés, de propriétés physiques telles que le moment linéaire et angulaire, l’équilibre statique ou les frottements au sol. Ils suggèrent également de petites modifications aux techniques standards d’interpolation qui dans certaines circonstances ajoutent un naturel significatif aux mouvements.

Dans ce chapitre, nous proposons une méthode générique de validation de mouvements de locomotion basée sur l’analyse des lois fondamentales de la physique (voir Figure 4.1). Mais analyser la dynamique requiert un grand nombre de paramètres contraignant le mouvement (les phases d’appui par exemple) et concernant le sujet (masses et inerties). Notre but est donc double : (1) la description d’un processus automatique, générique et indépendant de l’adaptation, calculant la dynamique d’une locomotion incluant l’évaluation de ces paramètres, (2) l’application de ce processus pour la validation de l’algorithme d’adaptation de mouvement.

Cette analyse en dynamique inverse est indépendante de la méthode d’adaptation. Nous calculons les forces et moments aux articulations et les comparons avec la littérature en biomécanique. Dans le processus de validation, nous nous intéressons plus particulièrement aux forces résultantes de réaction au sol, car nous pouvons les comparer à des données expérimentales issues de plateformes de force. Notre approche repose sur une modélisation du personnage (section 4.1) incluant les informations de masses et

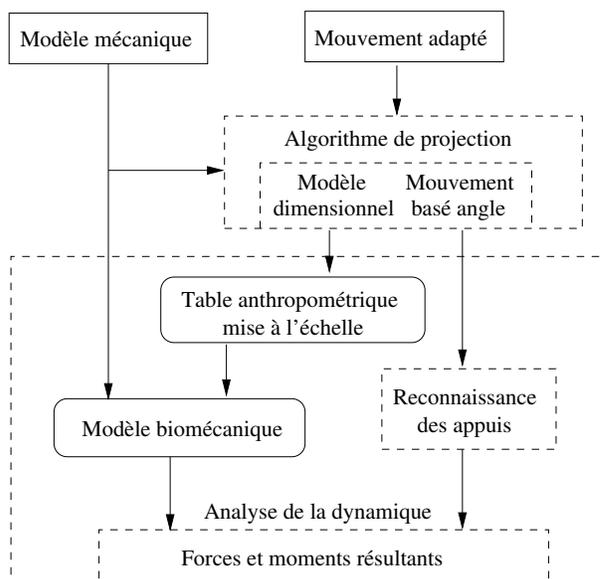


FIG. 4.1 – Vue générale du système d’analyse. Les entrées sont le mouvement capturé et la chaîne mécanique décrivant le squelette. Les sorties sont les forces et moments aux articulations (détail de la Figure 1.4).

d’inerties. Afin de fixer les paramètres dimensionnels du modèle et les paramètres angulaires de son mouvement, nous utilisons un algorithme de projection du mouvement (section 4.2). Puis, en utilisant une reconnaissance des phases d’appui au sol (section 4.3), nous analysons la dynamique et calculons les forces et moments aux articulations (section 4.4) (voir Figure 4.2). Nous pouvons ainsi évaluer les méthodes de d’adaptation morphologique et d’interpolation en utilisant les résultats d’analyses de mouvements réels et artificiels, ainsi que des données de la littérature et des données expérimentales issues de plateformes de force (section 4.5). La section 4.6 présente un exemple applicatif direct à cette méthode d’évaluation de la dynamique. Enfin en section 4.7, nous concluons ce chapitre et discutons des méthodes présentées dont la contribution au domaine peut être résumée en deux points : (1) la création automatique du squelette biomécanique d’un humanoïde basé sur une notation issue de la robotique et sur des tables anthropométriques, (2) l’évaluation des forces et moments aux articulations pour la validation de méthodes d’adaptation.

4.1 Création d’un modèle biomécanique

Dans cette section, nous présentons le processus que nous avons défini pour créer le modèle biomécanique de l’humanoïde. Nous définissons dans cette approche un modèle biomécanique comme un modèle dont les segments contiennent les informations de masses et d’inerties. Ce processus se déroule en deux phases. La première définit le modèle mécanique décrivant la hiérarchie et les degrés de liberté du squelette. La seconde

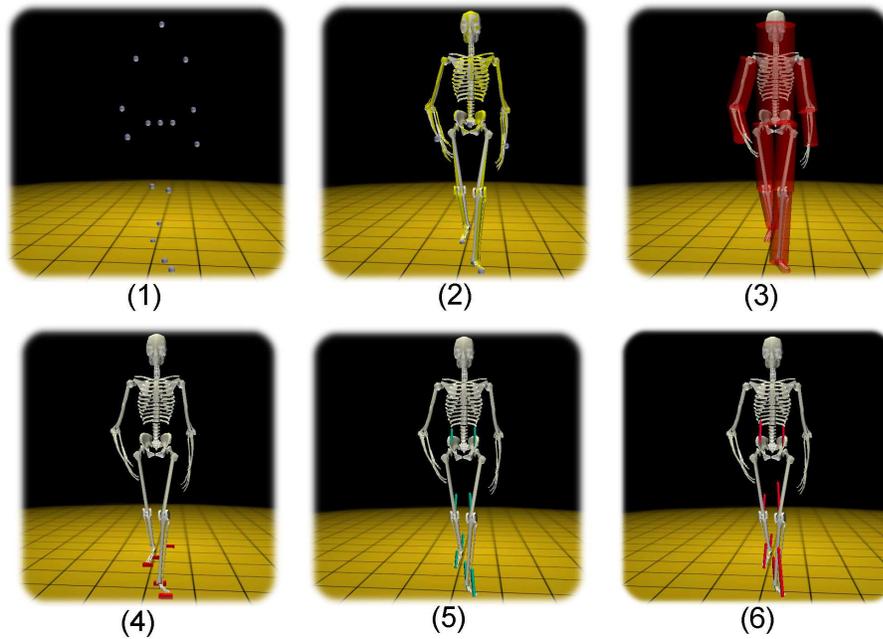


FIG. 4.2 – Quelques étapes clés de la méthode d'analyse de la dynamique. À partir d'un mouvement adapté (1), notre système projette le mouvement (2) sur un modèle mécanique du squelette incluant les informations de masses et d'inerties (3). Ensuite nous estimons les phases d'appui (4), et résolvons les lois de la dynamique, calculant ainsi les forces résultantes. Finalement nous validons (5) ou invalidons (6) le mouvement par comparaison avec la littérature et avec des données expérimentales.

détermine les informations segmentaires en fonction de valeurs moyennes et de lois.

4.1.1 Le modèle mécanique

La représentation de Denavit-Hartenberg [HD55] et sa notation modifiée [KK86] (Figure 4.3) sont devenues un moyen standard de représentation de chaînes articulaires et de la modélisation de leurs mouvements. Cette représentation est une méthode systématique d'attribution de référentiels aux corps d'une chaîne cinématique, permettant d'établir les transformations de passage entre articulations adjacentes. Il est alors possible de relier un degré de liberté au prochain et finalement d'assembler une représentation complète de la géométrie du robot. Quatre paramètres sont utilisés pour définir la matrice de transformation linéaire entre deux frames successifs associée à chaque ddl. Ces paramètres sont la longueur du lien d_j et l'excentrage a_j , la torsion α_j et l'angle θ_j entre les liens. 4 paramètres sont suffisants (au lieu de 6 a priori dans le cas général) car nous nous intéressons bien à une chaîne cinématique poly-articulée (où les axes des liaisons sont liés aux translations).

La représentation modifiée est particulièrement adaptée dans le cadre de la représentation d'un squelette d'humain virtuel. Ainsi, la hiérarchie de notre squelette est

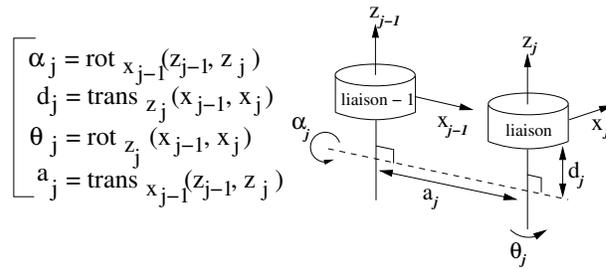


FIG. 4.3 – La représentation modifiée de Denavit-Hartenberg [KK86] décrivant le passage entre deux articulations consécutives : *liaison-1* et *liaison*. $rot_a(u, v)$ est la rotation autour de l'axe a amenant u parallèle à v et $trans_a(u, v)$ est la translation le long de l'axe a rendant u et v colinéaires. À droite est représentée la schématisation de ces relations avec $\alpha_j = 0$, $a_j > 0$, $\theta_j = \pi/2$ et $d_j = 0$.

directement incorporée dans cette représentation, de même que l'expression de la position et de l'orientation d'un ddl dans le repère de son parent.

Notre système calcule, sur tout le mouvement, des valeurs moyennes de distances entre articulations. Ces valeurs définissent les paramètres de translation d_j et a_j . Nous fournissons au système les paramètres rotationnels α_j et θ_j . La Figure 4.4 montre un exemple de paramètres rotationnels modélisant un squelette humain grâce à cinq chaînes mécaniques. Les liaisons rotules, à 3 degrés de libertés co-localisés, sont initialisées, en fonction des butées articulaires, afin d'exclure les éventuels blocages.

Ces notations ainsi que des algorithmes associés ont déjà fait l'objet de développements informatiques. Il existe notamment des bibliothèques MATLAB [®] utilisant ces modélisations [Cor96], ainsi que leurs versions C++ [Gou97] sur lesquelles nous reposons les manipulations des structures de données représentant le squelette.

4.1.2 Les paramètres segmentaires physiques

Les informations physiques qui sont nécessaires et suffisantes pour permettre de résoudre le problème de dynamique inverse sont les masses et inerties des membres. D'autres informations biomécaniques peuvent bien entendu être ajoutées pour prendre en compte des contraintes additionnelles [LHP05] telles que les préférences d'activations musculaires, des mécanismes d'élasticités et de rigidités variables aux articulations.

Dans la plupart des études anthropométriques, et en particulier dans celles que nous utilisons, les paramètres physiques de masses et d'inerties sont paramétrés par le genre de la personne ainsi que par les membres. Ces informations sont donc nécessaires au système de création d'un modèle biomécanique de la personne. Nous fournissons directement à ce système le genre de la personne. Et nous donnons une "sémantique" aux segments, c'est-à-dire que nous associons un segment entre deux articulations à un membre humain. Cette sémantique peut être effectuée manuellement ou assignée automatiquement si les systèmes articulaires correspondent à des labels prédéfinis. Nous utilisons des tables anthropométriques et lois de régression [ZSC90, DeL96] qui se basent

Membre	# ddl	θ	α	Nom
bras gauche	1	0	0	} épaule gauche
	2	$\pi/2$	$\pi/2$	
	3	0	$\pi/2$	
	4	0	0	
bras droit	5	0	0	} épaule droite
	6	$\pi/2$	$\pi/2$	
	7	0	$\pi/2$	
	8	0	0	
tronc	9	0	0	} bassin
	10	$\pi/2$	$\pi/2$	
	11	0	$\pi/2$	
jambe gauche	12	0	0	} hanche gauche
	13	$\pi/2$	$\pi/2$	
	14	0	$\pi/2$	
	15	0	0	
jambe droite	16	0	0	} hanche droite
	17	0	0	
	18	$\pi/2$	$\pi/2$	
	19	0	$\pi/2$	
	20	0	0	} genou droit
	21	0	0	
				cheville droite

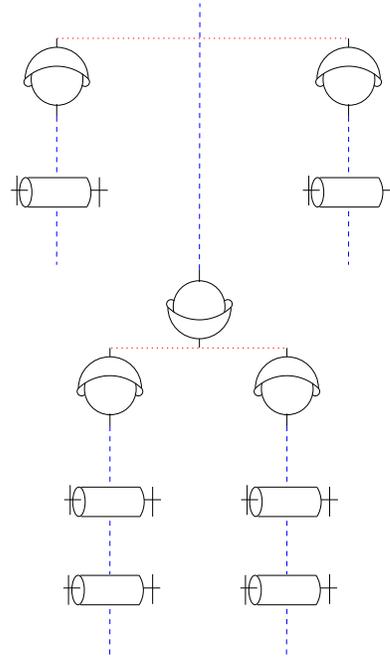


FIG. 4.4 – Un modèle mécanique de squelette humain avec la notation modifiée de Denavit-Hartenberg. À gauche : les paramètres rotationnels θ et α pour les 21 ddl. À droite : la description roboticienne associée avec des liaisons pivot et rotule.

sur les distances entre ces labels prédéfinis.

Grâce à l'évaluation des longueurs des membres (paramètres a_j), nous estimons la taille totale H puis la masse M du personnage en utilisant les tables décrites dans [DeL96]. Pour estimer les masses et inerties de chaque membre m , nous utilisons des lois de régression linéaires décrites dans [VDO99]. Ces lois utilisent une modélisation des membres par des cylindres de densité homogène et mettent en relation les paramètres physiques et les paramètres morphologiques.

– Masse

$$m_m = a.M + b.l_m.c_m^2 + c \quad (4.1)$$

où m_m est la masse du membre m , l_m sa longueur, c_m sa circonférence et (a, b, c) trois coefficients dépendant du genre et du membre.

– Inertie

$$I_m = d.M.(e.l_m^2 + f.c_m^2) + g \quad (4.2)$$

où I_m est le moment principal d'inertie du membre m et (d, e, f, g) quatre coefficients dépendant du genre et du membre. Nous avons une équation par axe principal d'inertie.

Bien qu'approximative, la modélisation en cylindre est correcte pour les membres inférieurs, la Table 4.1 résume les valeurs de ces coefficients pour la cuisse et la jambe.

	a	b	c
cuisse	0.1032	12.76	-1.023
jambe	0.0226	31.33	0.016

	d	e
cuisse	(0.00762,0.00726,0.00151)	(1.0,1.0,0.0)
jambe	(0.00347,0.00387,0.00041)	(1.0,1.0,0.0)

	f	g
cuisse	(0.076,0.076,1.0)	(0.01153,0.01186,0.00305)
jambe	(0.076,0.076,1.0)	(0.00511,0.00138,0.00012)

TAB. 4.1 – Valeurs des coefficients des équations de régression linéaires pour la cuisse et la jambe. Les trois composantes des coefficients (d, e, f, g) sont respectivement associées aux flexion/extension, abduction/adduction et rotations interne/externe.

Pour le haut du corps, les masses sont directement calculées par valeurs proportionnelles aux longueurs depuis les tables mises à l'échelle, et les inerties sont calculées grâce au rayon de giration :

$$I_m = m_m \cdot (l_m \cdot r_m)^2 \quad (4.3)$$

où r_m est le rayon de giration exprimé en pourcentage de l_m . Une valeur de r_m est disponible par axe principal d'inertie.

Ces tables anthropométriques et ces lois de régression donnent également des données sur le placement des centres de masses, les centres articulaires et les longueurs relatives intra et inter segments.

4.2 Reconstruction du mouvement articulaire

Dans cette section, nous étudions le problème de la reconstruction d'un mouvement articulaire à partir de données cartésiennes de marqueurs. En effet, une méthode de dynamique inverse travaille obligatoirement avec les vitesses et accélérations angulaires. La première étape consiste donc à évaluer les postures angulaires de l'humanoïde.

4.2.1 Principe de projection

La méthode répondant au problème posé se base sur le principe de projection du mouvement (*mapping*). En général, projeter un mouvement sur un modèle physique est un problème sous contraint dont les optimisations requièrent une métrique pour trouver une unique posture. Par exemple en utilisant des approches en cinématique inverse optimisée [ZB94] ou par des contraintes spatiales [BB98] pour préserver les positions des effecteurs. Ce principe de projection peut également servir à des applications orientées vers l'interactivité à travers la manipulation d'humains virtuels [OTH02] ou bien à retrouver un mouvement 3D dans une base de données à partir de dessins 2D [LGY⁺06].

4.2.2 Reconstruction séquentielle

Dans notre approche, nous résolvons le problème de projection de manière séquentielle, système articulaire par système articulaire. À chaque pas de temps, nous utilisons une reconstruction géométrique directe. Nous calculons la matrice de rotation M_j^{j+1} entre le système articulaire courant $SysArt_j$ et le suivant $SysArt_{j+1}$. Cette matrice de rotation permet d'obtenir la position $PositionProjetee_{SysArt_{j+1}}$ du système articulaire suivant la plus proche de la position désirée $PositionBrute_{SysArt_{j+1}}$. Les segments représentant les membres sont donc définis par les vecteurs successifs $\overrightarrow{mem}_{j,j+1} = \overrightarrow{SysArt_j} \overrightarrow{SysArt_{j+1}}$. Nous traitons deux cas à chaque pas de temps suivant le type de la liaison étudiée :

- Si l'articulation $SysArt_j$ est une liaison pivot, le produit scalaire entre les vecteurs normalisés représentant les membres liés par la liaison donne le *cosinus* de l'angle recherché θ'_j : $\overrightarrow{mem}_{j-1,j} \cdot \overrightarrow{mem}_{j,j+1} = |\overrightarrow{mem}_{j-1,j}| \cdot |\overrightarrow{mem}_{j,j+1}| \cdot \cos(\theta'_j)$. Nous ajoutons θ'_j , dont le signe est déterminé par le produit vectoriel $\overrightarrow{mem}_{j-1,j} \wedge \overrightarrow{mem}_{j,j+1}$, à la valeur initiale de θ_j définie par le modèle mécanique.
- Si l'articulation $SysArt_j$ est une liaison rotule (constituée de trois liaisons pivot successives), nous devons choisir la matrice M_j^{j+1} parmi une infinité de solutions. Mais nous avons souvent des contraintes additionnelles qui réduisent le nombre de solutions. Par exemple lorsque l'articulation suivante $SysArt_{j+1}$ est une liaison pivot, l'axe \overrightarrow{x}_j est déjà défini suivant la direction $(SysArt_j, SysArt_{j+1})$. Donc, afin de minimiser la future erreur entre la $PositionProjetee_{SysArt_{j+2}}$ et la $PositionBrute_{SysArt_{j+2}}$, \overrightarrow{z}_j doit être colinéaire à \overrightarrow{z}_{j+1} , et donc colinéaire au produit vectoriel : $\overrightarrow{mem}_{j,j+1} \wedge \overrightarrow{mem}_{j+1,j+2}$. Une valeur moyenne de \overrightarrow{z}_j peut ainsi être calculée tant que les $SysArt_{j+k}$ sont des liaisons pivots afin de minimiser les k erreurs successives. Si nous n'avons pas de contraintes additionnelles, nous calculons la rotation minimale par rapport au repère précédent.

La Figure 4.5 montre un résultat de notre algorithme de projection avec le modèle mécanique présenté en Figure 4.4. La discussion de ce résultat ainsi que l'évaluation de son influence sur la dynamique seront présentées en section 4.5. Mais nous pouvons déjà remarquer que l'approximation des systèmes articulaires des genoux, des chevilles et des coudes par des liaisons pivots entraîne des différences dans les postures reconstruites.

4.3 Détermination des phases d'appui au sol

Pour résoudre le problème de dynamique inverse, nous devons connaître les forces extérieures appliquées au système. Pour la locomotion, ces forces peuvent être résumées à :

- la gravité ;
- les forces de réaction au sol ;

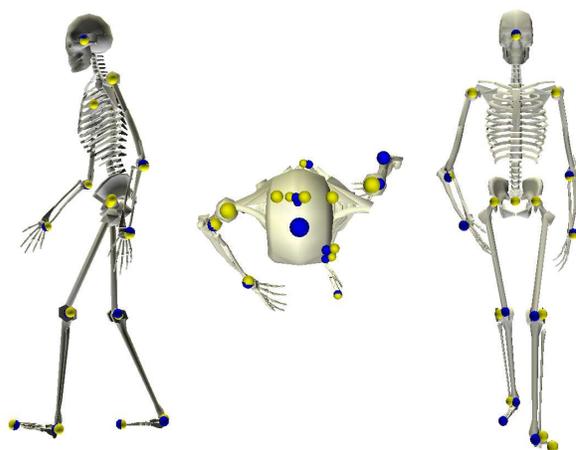


FIG. 4.5 – Vues sagittale, transversale et frontale d'un mouvement de marche projeté sur le modèle aux dimensions et types de liaison fixes. Les sphères bleues sont les marqueurs initiaux réels et les sphères jaunes sont les centres articulaires du modèle virtuel.

– et les forces aérodynamiques.

L'application de la force de gravité est constante et nous supposons que les efforts aérodynamiques sont négligeables. Nous nous intéressons donc à la détermination des forces de réaction au sol. Cette détermination est réalisée en deux étapes. Dans la première étape, nous évaluons les points de contacts, c'est-à-dire les posés de talon et levés d'orteils. La seconde étape, présentée dans la section 4.4, consiste à appliquer la seconde loi de Newton en vue de déterminer les forces et les moments aux articulations.

4.3.1 Évaluations de différentes méthodes

À l'instar de méthodes de correction d'appuis au sol [KGS02], de récents travaux [IAF06] ont montrés les limites de l'utilisation de méthodes de reconnaissance basées sur la vitesse et l'amplitude des pieds (appelées *speed* et *height* par les auteurs). Ils utilisent dans leur approche une méthode d'apprentissage. Ils "entraînent" leur système à reconnaître les appuis au sol sur des mouvements labellisés à la main à partir des positions relatives des membres inférieurs. Dans notre travail, trois méthodes sont évaluées par comparaison à une estimation visuelle dont la précision est égale à la fréquence d'échantillonnage du système de capture de mouvements. Ces méthodes se basent sur les mouvements des marqueurs (par exemple le talon ou l'orteil) et des centres articulaires calculés à partir des marqueurs (par exemple la cheville).

Les deux premières méthodes sont des méthodes proches de *vitesse* et *amplitude*, où les seuils de contacts sont ici évalués statistiquement sur une base de données de locomotions. Ces deux méthodes peuvent être considérées comme des méthodes intermédiaires entre un apprentissage avec oracle et des méthodes ad hoc aux squelette/mouvement. Les posés de talons sont établis lorsque ceux ci descendent sous le seuil, les lever d'orteils lorsque ces derniers passent au dessus, les deux seuils pouvant être différents. L'idée de

la troisième méthode, notée *config*, repose sur l'observation de la trajectoire de l'orteil dans le repère du talon (voir Figure 4.6). Lors de l'extension maximale, c'est-à-dire le posé de talon, nous observons un maximum local que nous pouvons repérer dans un cycle de locomotion. Lors de la flexion maximale, c'est-à-dire le levé d'orteil, nous remarquons un point de croisement entre ces deux positions que nous pouvons également facilement repérer dans un cycle de locomotion.

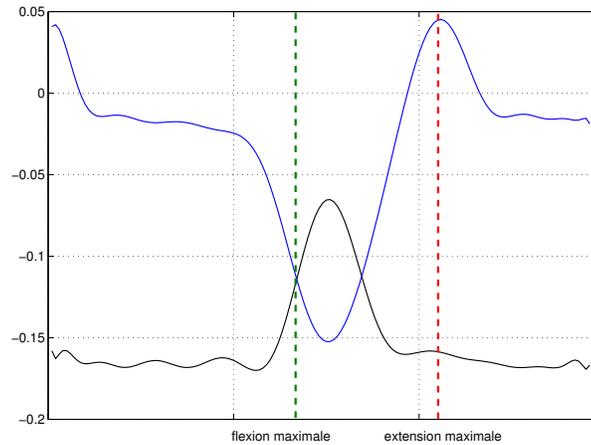


FIG. 4.6 – Trajectoire verticale (bleue) et sagittale (noire) de l'orteil dans le repère du talon. L'extension maximale (instant rouge) correspond à un maximum vertical local, et la flexion maximale (instant vert) correspond au croisement des composantes verticales et sagittales de la trajectoire.

4.3.2 Résultats de la reconnaissance d'appui au sol

Pour plus de généralité, nous avons étudiés ces méthodes de reconnaissance avec quatre ensembles de points possibles de support. Nous présentons dans cette section, les résultats obtenus avec notre exemple de points précédent : les talons et orteils, les résultats concernant les autres configurations sont donnés en Annexe C. Nous présentons en Table 4.2, les évaluations des méthodes grâce aux quatre critères suivants.

Nombre d'échecs. La méthode de référence *visuelle* n'échoue évidemment jamais. Les méthodes *vitesse* et *config* ont toujours données des résultats valides pour l'ensemble donné des 12 locomotions, et la méthode *amplitude* a un taux de réussite de 66%. À la vue de ces résultats, nous pouvons assurer qu'au moins une des méthodes donnera un résultat valide.

L'erreur moyenne : $\bar{e} = \frac{\sum_{i=1}^N |F_{ref_i} - F_{eval_i}|}{N}$, où F_{ref_i} est l'instant de référence du contact i défini par *visuelle*, F_{eval_i} est l'instant évalué, et N est le nombre de contacts (48 dans notre exemple). C'est la différence moyenne de l'évaluation des instants de contacts. Les erreurs pour les méthodes *vitesse* et *amplitude* sont acceptables, mais

critère/rang	1	2	3
Nombre d'échecs	(0) vitesse	(0) config	(16) amplitude
Erreur moyenne	(2.3) vitesse	(5.6) amplitude	(9.7) config
S.D.	(1.6) vitesse	(2.1) config	(2.4) amplitude
S.D. norm.	(-) config	(0.41) amplitude	(0.50) vitesse

TAB. 4.2 – Les méthodes sont rangées par ordre décroissant de qualité pour chaque critère. La qualité est établie en comparaison avec la méthode de référence *visuelle*. Nous évaluons les méthodes sur 12 locomotions, donc sur $12 \times 2(\text{gauche-droite}) \times 2(\text{flexion-extension}) = 48$ contacts.

pour *config*, une valeur de 9.7 (c'est-à-dire 0.17 s) est assez grande.

L'écart type de l'erreur : $sd = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (e_i - \bar{e})^2}{N}}$, où e_i est l'erreur au contact i , et \bar{e} son erreur moyenne. Ce critère montre la stabilité des algorithmes de reconnaissance. Nous notons une fois encore la bonne précision de la méthode basée sur la vitesse, celles basées sur l'amplitude et sur la configuration sont très acceptables.

L'écart type normalisé des valeurs des paramètres : $sdn = \frac{\sum_{i=1}^p sd(param)}{p \cdot \overline{param}}$, où $sd(param)$ est l'écart type des valeurs des paramètres, \overline{param} est leur erreur moyenne, et p est le nombre de paramètres (2 pour les deux méthodes concernées *vitesse* et *amplitude*). Ce critère montre la stabilité des paramètres, c'est-à-dire des seuils de vitesse et d'amplitude. Nous voyons ici l'intérêt principal de la méthode *config* puisqu'elle ne nécessite pas de paramètre. Aucune des deux méthodes ne semble se distinguer. Mais nous pouvons noter que les paramètres sont assez stables, ce qui nous permet d'utiliser des valeurs moyennes pour toute locomotion (voir Table 4.3).

	posé de talon	levé d'orteil
<i>amplitude</i> (%)	13.0	13.37
<i>vitesse</i> (m/s)	0.73	0.39

TAB. 4.3 – Valeurs moyennes des seuils. Les amplitudes sont en pourcentage d'élévation maximale du pied durant un cycle.

Nous effectuons les mêmes calculs statistiques pour trois autres configurations de points de contacts : *cheville et orteil*, *cheville seule* et *talon seul*. Ces résultats statistiques sont présentés en Annexe C. Différents protocoles de positionnement de marqueurs sont ainsi analysés. Les résultats montrent l'importance du talon (pour la détection des extensions) et de l'orteil (pour la détection des flexions). Notre algorithme de reconnaissance utilise la méthode la mieux adaptée en fonction de sa qualité et de la configuration du squelette. Dans notre configuration, *talon et orteil*, la méthode la mieux adaptée est celle basée sur la vitesse.

4.4 Principe Fondamental de la Dynamique

Dans cette section, nous allons appliquer le Principe Fondamental de la Dynamique (PFD) sur le mouvement. Grâce à la connaissance des phases d'appui au sol, au modèle biomécanique du squelette et aux données angulaires, nous calculons les forces et moments agissant aux articulations suivantes : chevilles, genoux, hanches, épaules et coudes. Pour effectuer ces calculs, nous fournissons un processus automatique que nous décrivons en quelques points.

4.4.1 Calcul des centres de masse

Les centres de masse (CdM) des membres de l'humanoïde sont déterminés par les tables anthropométriques en même temps que les calculs d'inerties en ces points (vus en section 4.1.2). Dans notre travail, nous n'aurons pas à calculer les centres de masse des chaînes cinématiques utilisées. Dans certains travaux [Kul05], ces centres de masses intermédiaires sont utilisés pour apporter des adaptations cinétiques en priorisant les chaînes. Ici, en plus des CdM des membres, seul le CdM global de l'humanoïde nous sera utile. Ce point CG est défini classiquement à l'aide d'une somme pondérée des CdM des membres :

$$CG = \frac{\sum_m (m_m \times CdM_m)}{\sum_m m_m} \quad (4.4)$$

où m_m est la masse du membre m et CdM_m la position de son centre de masse. Comme prévu, nous obtenons pour toutes les locomotions analysées un CdM global proche de la position de la racine de l'humanoïde (voir Figure 4.7).

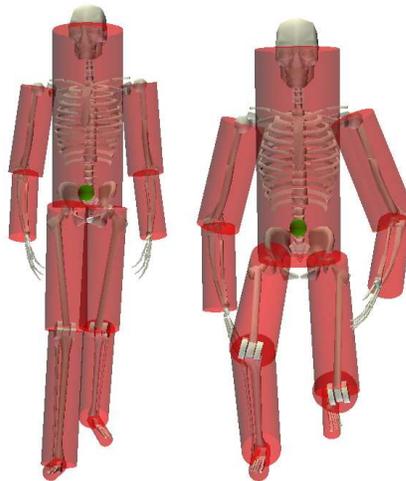


FIG. 4.7 – Calcul du centre de masse global (vert) de l'humanoïde à partir des masses et des centres de masse de tous les membres.

4.4.2 Principe d'isolement et seconde loi de Newton

Une étape préliminaire à l'application de la seconde loi de Newton sur le mouvement repose sur le principe d'isolement des segments. Ce principe porte le nom de *Free Body Diagram* (FBD). Un FBD est un diagramme sur lequel le segment ou corps étudié est isolé de son environnement et où les forces et moments extérieurs agissant sur lui sont appliqués (voir Figure 4.8).

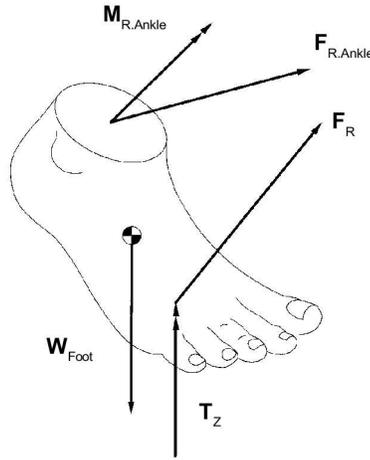


FIG. 4.8 – Principe d'isolement appliqué au pied droit en appui [VDO99]. Les forces extérieures agissant sur le pied sont son poids W_{Foot} , la force de réaction au sol F_R et la force du reste du corps sur la cheville $F_{R.Ankle}$. Les moments extérieurs exprimés au CdM sont le moment au sol T_z et le moment dû au mouvement du reste du corps à la cheville $M_{R.Ankle}$.

L'étape suivante est d'appliquer le PFD, ou seconde loi de Newton, sur chaque segment avec l'aide de la notation FBD.

Définition : Le Principe Fondamental de la Dynamique nous dit que : le torseur dynamique d'un segment s est égal au torseur des actions extérieures agissant sur s .

Ce principe possède deux expressions : une en translation et une en rotation.

Expression en translation : La somme des forces externes agissant sur le segment s est égale au produit de sa masse m_s (supposée constante) par l'accélération de son centre de gravité CG_s :

$$\sum \overrightarrow{Forces}_s = m_s \cdot \vec{a}_{CG_s} \quad (4.5)$$

Expression en rotation : La somme des moments externes agissant sur un segment s est égale à la dérivée de son moment dynamique $\vec{\delta}_s$.

$$\sum \overrightarrow{Moments}_s = \vec{\delta}_s \quad (4.6)$$

$\vec{\delta}_s$ est une fonction de l'inertie $[I]_{CG_s}$ et de l'accélération angulaire $\vec{\omega}_{CG_s}$. Exprimée en

CG_s et dans un repère lié au segment s , $\vec{\delta}_s$ vaut :

$$\vec{\delta}_s = [I]_{CG_s} \cdot \vec{\omega}_{CG_s} \quad (4.7)$$

Nous avons donc la formulation suivante :

$$\sum_j \vec{M}_s = \sum_j (\overrightarrow{CG_s O_j} \wedge \vec{F}_{j/s}) + \sum_j \vec{C}_{j/s} = [I]_{CG_s} \cdot \vec{\omega}_{CG_s} \quad (4.8)$$

où O_j est le point d'application à l'articulation j de la force externe $\vec{F}_{j/s}$ agissant sur s , et $\vec{C}_{j/s}$ est le moment en O_j .

4.4.3 Résolutions des équations des torseurs

La structure des équations précédentes dépend des forces externes appliquées sur le corps. La gravité étant invariante, nous les résolvons en fonction des forces de réaction au sol. Dans le cas d'un mouvement de locomotion, il y a trois états possibles : simple appui, double appui, et pas d'appui, ce qui change l'ordre d'évaluation des équations (voir Figure 4.9).

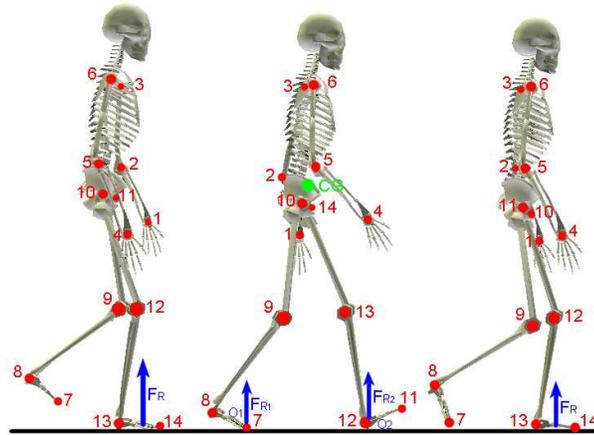


FIG. 4.9 – Ordre d'évaluation des équations. Gauche et droit : simple appui, résolution itérative depuis les segments libres jusqu'au pied d'appui. Centre : double appui, résolution globale en utilisant le mouvement du centre de gravité (CG) et les positions des appuis (O_1, O_2).

Expression en translation :

- simple appui

Pendant une phase de simple appui, nous résolvons récursivement l'expression en translation de la loi depuis les segments libres (pied libre et mains) jusqu'au pied en appui. Étant donné qu'il n'y a pas de force additionnelle agissant sur les segments libres,

nous pouvons y résoudre l'équation et calculer la force agissant sur le segment suivant, et ainsi de suite. Les parties gauche et droite de la Figure 4.9 montre l'ordre d'évaluation utilisé : bras gauche, bras droit, jambe libre (les trois calculs sont indépendants), puis la jambe en appui depuis la hanche jusqu'au sol. Nous pouvons utiliser l'algorithme suivant pour résoudre l'équation à chaque articulation \mathbf{a} associée au segment \mathbf{s} .

POUR TOUTE articulation a FAIRE
 $poids_s = \{O.O, O.O, -g \cdot m_s\};$
 $force_a = m_s \cdot acc_s - poids_s;$
 $force_a = force_a - force_{a-1};$
FAIT

- double appui

Lorsque l'humanoïde est en phase de double appui, l'algorithme précédent ne peut pas être directement appliqué car les deux forces de réaction au sol \vec{F}_{R_1} et \vec{F}_{R_2} sont inconnues (centre de la Figure 4.9). Par contre, le mouvement du système global donne l'équation :

$$\vec{F}_{R_1} + \vec{F}_{R_2} + (-\vec{g}) \cdot \sum m_s = (\sum m_s) \cdot \vec{a}_{CG} \quad (4.9)$$

où $(-\vec{g}) \cdot \sum m_s$ équivaut au poids total du personnage. Pour résoudre cette équation à deux inconnues, nous utilisons l'expression en rotation en CG :

$$\overrightarrow{CG O_1} \wedge \vec{F}_{R_1} + \overrightarrow{CG O_2} \wedge \vec{F}_{R_2} = [I]_{CG} \cdot \vec{\omega}_{CG} \quad (4.10)$$

où O_1 et O_2 sont les positions connues d'appui, $[I]_{CG}$ la matrice d'inertie et $\vec{\omega}_{CG}$ le vecteur d'accélération angulaire. Le terme en moment angulaire est nul car il n'y a pas de moment localisé en ces points d'appui. Nous utilisons cette propriété dans le modèle que nous utilisons car exact dans une première approximation. En effet, durant le déroulé de talon et la phase d'appui total du pied, ce moment est quasi nul. Pour améliorer le modèle nous pourrions en déterminer la contribution lors du levée d'orteil où le moment n'est pas forcément négligeable (dans des cas de propulsion importante). Avec ces deux équations, nous sommes capables de calculer les forces de réaction au sol et donc résoudre itérativement l'équation en translation depuis les supports jusqu'aux hanches.

- sans appui

Pendant une phase de vol, le calcul est simple, il n'y a pas de force additionnelle, donc nous résolvons les quatre chaînes indépendamment depuis les segments libres jusqu'au tronc. Ce cas est utilisé dans des mouvements de courses et de sauts. Nous obtenons ainsi les forces résultantes pour tout type de locomotion.

Expression en rotation :

Le terme de droite de l'équation 4.7 est calculé à partir du mouvement et des données inertielles, mais $[I]_{CG_s}$ est toujours exprimé dans le repère local. L'équation exprimée

dans le repère global est :

$$\vec{\delta}_s = R_s^T \cdot [I]_{CG_s} \cdot R_s \cdot \vec{\omega}_{CG_s} \quad (4.11)$$

où R_s est la matrice de rotation du segment s . Nous pouvons alors appliquer l'algorithme suivant pour calculer les moments à chaque articulation \mathbf{a} associée au segment \mathbf{s} .

```

POUR TOUTE articulation a FAIRE
   $poids_s = \{O.O, O.O, -g \cdot m_s\}$ ;
   $Moment\_du\_au\_poids_a = |aCG_s| \wedge poids_s$ ;
   $Moment\_du\_a\_la\_force_{a-1} = |a(a-1)| \wedge force_{a-1}$ ;
   $Moment_a = \delta_s - Moment\_du\_a\_la\_force_{a-1}$ 
    -  $Moment\_du\_au\_poids_a - Moment_{a-1}$ ;
FAIT

```

4.5 Validation

Nous avons finalement atteint notre objectif d'analyse en dynamique inverse en calculant les torseurs aux articulations. Nous allons pouvoir répondre aux trois questions qui se posent sur la méthode d'adaptation présentée :

- Les mouvements adaptés sont ils physiquement valides ?
- Quelles sont les limites de la méthode d'adaptation ?
- Et ces limites sont elles dues à l'adaptation morphologique ou bien à l'interpolation ?

Dans cette section, nous répondons à ces questions en étudiant particulièrement les Forces de Réaction au Sol (FRS).

4.5.1 Validation de la résolution en dynamique inverse

La première question est : les mouvements adaptés sont ils physiquement valides ? Pour répondre à cette question, nous appliquons une adaptation *vide*, c'est-à-dire que nous adaptons morphologiquement le mouvement à des données réelles connues et que nous utilisons ces mêmes données pour interpoler le mouvement. La Figure 4.10 montre la comparaison des FRS de mouvements issus de telles adaptations *vides* avec les mesures expérimentales par plateformes de force des mêmes personnes.

Les mesures expérimentales montre que la première personne a produit trois FRS presque semblables, ce qui est lié à un style de locomotion constant. Notre processus d'adaptation n'a pas de difficulté à reproduire un tel mouvement et donc des FRS identiques. Dans la seconde expérimentation, le style de locomotion est variable, les FRS adaptées et analysées ont ainsi des maxima locaux identiques mais des caractéristiques du mouvement différentes (voir section 4.5.3). La troisième expérimentation montre des FRS mesurées irrégulières, les forces adaptées résultantes sont différentes tout en restant valides par rapport aux amplitudes maximales. Ces résultats sont probablement dus à un décalage de la vitesse de déplacement (voir section 4.5.3.3).

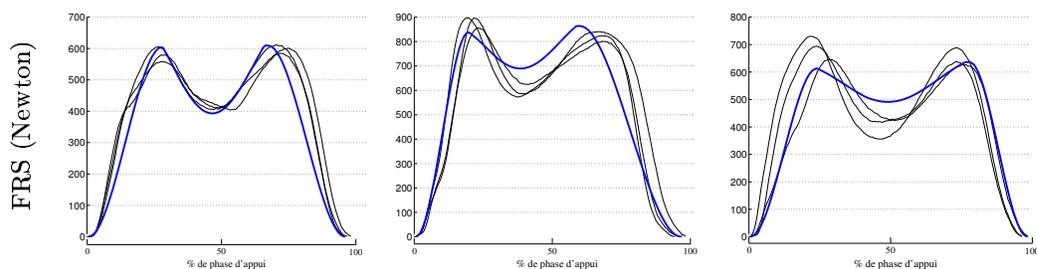


FIG. 4.10 – À gauche : un homme de 55.4kg, au milieu : un homme de 79.6kg, à droite : une femme de 58.2kg. Les courbes noires représentent les 3 forces de réaction au sol (en Newton) mesurées par des plateformes. Les courbes bleues sont les FRS analysées provenant de locomotions normales adaptées aux paramètres biomécaniques des mêmes personnes.

Analysons maintenant différents styles de locomotions réelles en prêtant attention aux FRS (voir Figure 4.12 et Figure 4.11). Nous avons comparé les résultats des analyses avec les données décrites dans la littérature [ANC89, FDCM97, VDO99, FCKV06]. Notre analyse en dynamique inverse donne des résultats valides en comparaison à ces valeurs et à celles de nos mesures expérimentales. Nous pouvons d’ailleurs y observer des propriétés bien connues. L’amplitude (en Newton) de la force verticale est environ trois fois plus importante que la force horizontale. Cette force verticale possède la double bosse généralement observée en biomécanique, et excède le poids du corps à deux instants différents durant la phase d’appui. La force latérale a une amplitude au moins dix fois moindre que la force verticale. Durant une grande partie de la phase d’appui, cette force est négative ce qui signifie que l’humanoïde pousse vers l’intérieur du pied. La force horizontale agit vers l’arrière pendant la première moitié de l’appui, et devient l’opposé lorsque la personne se propulse. Nous vérifions également d’autres propriétés biomécaniques telles que la durée d’appui et les valeurs des moments.

Ainsi, nous pouvons a priori assurer que notre processus d’analyse en dynamique inverse donne des résultats valides, ce qui répond à notre première interrogation concernant la validation. Deux questions subsistent : quelles sont les limites de la méthode d’adaptation, et ces limites sont-elles dues à l’adaptation morphologique ou bien à l’interpolation ? Pour y répondre nous étudions séparément leurs influences sur les FRS et en déterminons les limites.

4.5.2 Influence de l’adaptation morphologique

Afin d’étudier l’influence de l’adaptation morphologique sur le réalisme physique des mouvements adaptés, nous observons les FRS lorsque nous changeons la morphologie du personnage.

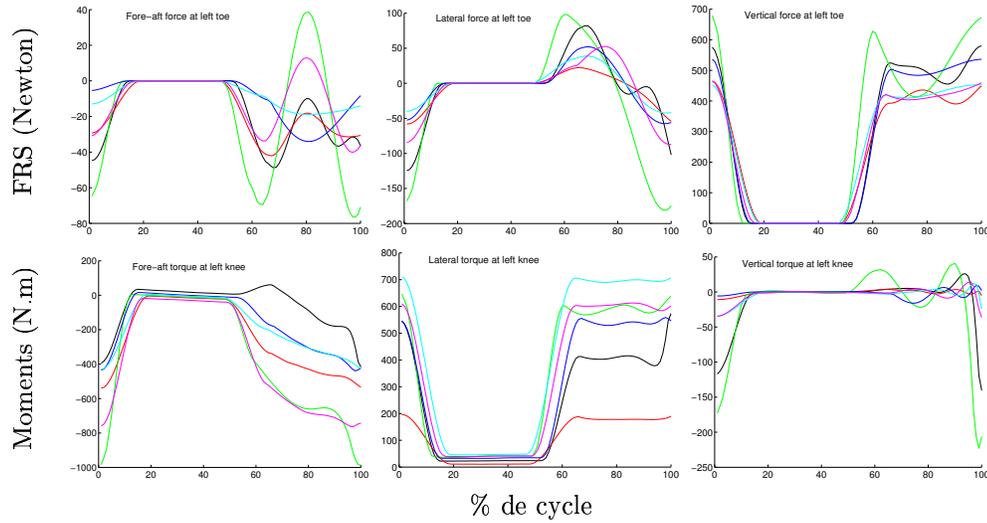


FIG. 4.11 – En haut : les forces résultantes (en Newton) au pied gauche pour 6 locomotions réelles analysées. En bas : les moments (en N.m) au genou gauche pour les mêmes locomotions. Un cycle de marche complet est affiché depuis le posé du talon droit jusqu'au suivant.

4.5.2.1 Mise à l'échelle globale

Dans cette section, nous adaptons un mouvement non interpolé à plusieurs morphologies. Nous avons défini un échantillon représentatif de 8 morphologies différentes dont les tailles des membres varient du simple au double. Nous examinons alors les FRS résultantes qui sont calculées par l'algorithme de dynamique inverse (voir Figure 4.13(a)).

Les résultats montrent que la taille globale de l'humanoïde a une très grande influence sur la dynamique du mouvement. Et en effet, les masses des membres sont les paramètres les plus influents dans les équations de la dynamique (voir Équation 4.5). Ainsi représentées, il est difficile de comparer réellement les FRS et d'en déterminer les influences sur la dynamique. C'est pourquoi nous voulons les "adimensionner" par les différences morphologiques et les comparer à une morphologie de référence que nous choisissons comme la morphologie médiane de notre échantillon. Cette morphologie médiane, qui correspond à la morphologie pour laquelle le nombre de personnes de taille supérieure est égal au nombre de personnes de taille inférieure, possède alors par définition un facteur de mise à l'échelle s de 1.0. Le coefficient nous permettant d'adimensionner les FRS est défini comme étant le coefficient de normalisation CN appliqué aux FRS qui minimise l'erreur RMS cumulée d'ordre 1 avec les FRS de référence FRS_{ref} :

$$CN = \lambda \text{ tel que } \lambda, \mu \in [0, 2 \times s] \text{ et} \quad (4.12)$$

$$\sum |FRS - \lambda \times FRS_{ref}| \leq \sum |FRS - \mu \times FRS_{ref}|$$

Nous présentons cette relation en Figure 4.13(b), où nous affichons en abscisse le

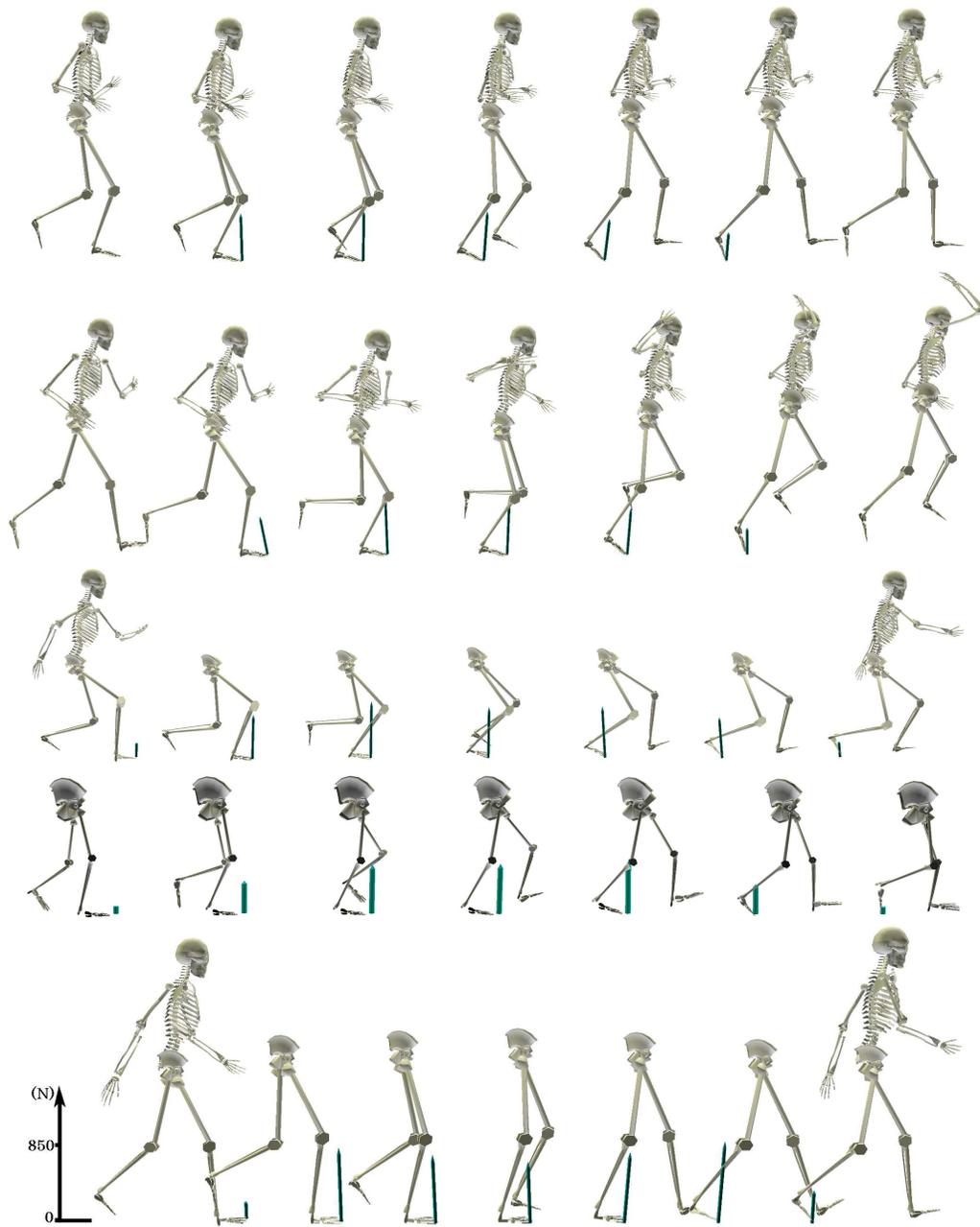


FIG. 4.12 – Forces de réaction au sol au pied droit pendant des phases de support de différents types de locomotions réelles, issues de la base de données. Premier : une course d'un homme. Second : un saut à un pied (tir au handball). Troisième : une marche fléchie d'un homme. Quatrième : une marche d'un enfant de 2 ans. Cinquième : une marche normale d'une femme.

facteur de la mise à l'échelle s et en ordonnée les coefficients de normalisation CN . La relation obtenue peut être considérée comme une fonction linéaire, ce qui signifie que les torseurs évoluent de manière linéaire en fonction de la taille de la personne. La régression linéaire obtenue possède un coefficient de corrélation linéaire de 0.87 ce qui est considéré comme une valeur d'ajustement valide (supérieur à $\frac{\sqrt{3}}{2}$). Nous avons également comparé les FRS avec des données expérimentales issues de 5 mesures de plateformes de forces, et nous avons constaté le respect de cette propriété sur un échantillon de personnes réelles allant d'un facteur 0.7 à 1.2 par rapport à la personne médiane de cet échantillon de 5 personnes. En dessous du facteur 0.7 et au dessus de 1.2 nous supposons uniquement que la relation est toujours valide.

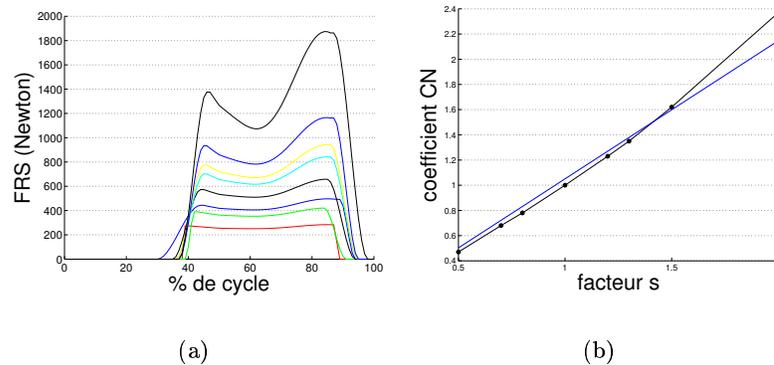
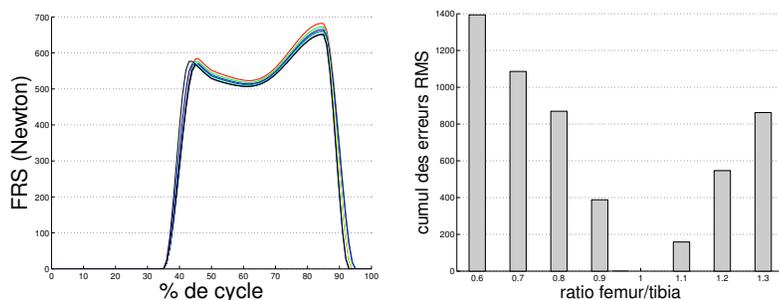


FIG. 4.13 – Influence d'une mise à l'échelle globale. (a) Nous adaptions une locomotion sur 8 morphologies aux facteurs d'échelle : 0.5, 0.7, 0.8, 1.0, 1.2, 1.3, 1.5 et 2.0. (b) Les coefficients de normalisation sont affichés en fonction des facteurs d'échelle s , ainsi que la droite de régression (bleue).

4.5.2.2 Ratio fémur/tibia

Dans cette section, nous étudions l'influence de la modification des longueurs relatives des membres. Cette étude est utile pour évaluer les erreurs initiales dans l'estimation de centres articulaires à partir de marqueurs 3D et donc dans les longueurs des membres. Ici, nous changeons le ratio entre les longueurs du fémur et du tibia, sans pour autant changer la longueur totale de la jambe. Les FRS résultantes sont affichées en Figure 4.14(a). Nous présentons en Figure 4.14(b) les erreurs RMS d'ordre 1 cumulées sur un cycle entre les FRS adaptées et l'originale. Nous avons pu comparer les résultats avec un échantillon de données expérimentales de ratios fémur/tibia compris entre 0.8 et 1.2. Les erreurs RMS observées dans cet intervalle sont assez faibles (approximativement 6 Newtons). Mais lorsque nous observons l'erreur associée à un ratio inférieur (0.6) qui est d'environ 13 Newtons, nous pouvons supposer qu'adapter morphologiquement une locomotion hors de cet intervalle produit beaucoup plus facilement un mouvement non valide. Nous constatons que plus le ratio est loin de 1, plus l'influence est grande. Ceci signifie que la propriété de somme constante des longueurs des membres ne com-

pensent pas les différences entre les longueurs relatives. Ceci vient en particulier du fait que les membres n'ont pas les mêmes propriétés physiques (rapports longueur/masse différents).



(a)

(b)

FIG. 4.14 – Influence du ratio fémur/tibia. (a) Nous adaptions une locomotion à 8 valeurs de ratios : 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 0.95, 1.1, 1.2 et 1.3, notre ratio initial étant de 0.95. (b) Les cumuls des erreurs RMS d'ordre 1 des FRS sont affichés en fonction des ratios.

Nous notons un autre phénomène logique mais important auquel il faut être attentif. Quand un mouvement est adapté, les déplacements des membres les plus lourds sont les plus influents. On peut observer ce phénomène encore plus facilement en changeant le ratio haut/bas du corps, non présenté ici, car le tronc possède une masse beaucoup plus importante que les autres membres. Nous pouvons donc conseiller, dans les méthodes d'adaptation de mouvement, de pondérer les modifications des longueurs relatives des membres par leurs masses.

4.5.2.3 Structure du squelette

Dans cette section, nous modifions la structure du squelette à travers la manipulation des degrés de liberté du modèle. Nous adaptions morphologiquement une locomotion à deux squelettes ayant respectivement 33 et 21 ddl. Ils diffèrent par les articulations suivantes : les coudes, genoux et chevilles où les liaisons rotules (3 ddl) du premier modèle deviennent des liaisons pivots (1 ddl) dans le second. En effet, dans de nombreuses méthodes d'animation, ces articulations sont en général approximées par des liaisons pivots, il est donc intéressant d'étudier l'influence de ce type de simplification sur la cinématique mais aussi sur la dynamique des mouvements. En terme de cinématique, la Figure 4.15 montre la somme des distances Euclidiennes des positions des centres de gravité des 11 membres sur un cycle de locomotion.

La moyenne des distances entre les 11 membres est de 0.15 mètre, c'est-à-dire 1.4 cm par membre. Cette valeur n'est a priori pas petite, mais est-elle significative ? Les FRS résultantes des deux mouvements adaptés sont affichées en Figure 4.16(a) et leurs erreurs RMS d'ordre 1 en Figure 4.16(b).

L'erreur latérale est très faible et ceci est logique puisque durant la locomotion l'accélération linéaire des membres est faible sur cet axe. Lorsqu'une locomotion est

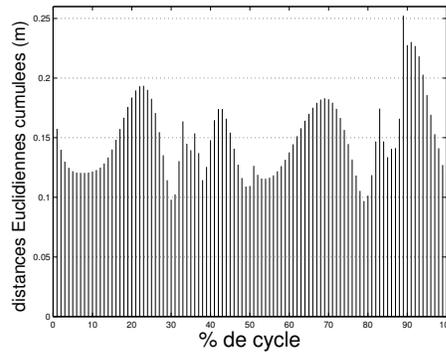


FIG. 4.15 – Somme, sur un cycle, des distances Euclidiennes (en mètres) entre les positions des centres de gravité des 11 membres des deux squelettes à 33 et 21 ddl.

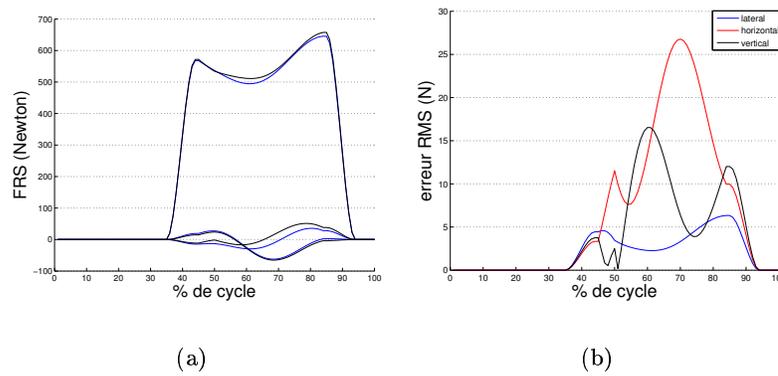


FIG. 4.16 – Influence de la structure du squelette. (a) Les 3 composantes des FRS (en bleu 21 ddl, en noir 33 ddl) sur un cycle de locomotion, et (b) leurs erreurs RMS d'ordre 1.

adaptée sur un squelette plus restrictif (moins de ddl), l'influence sur l'axe horizontal est plus importante que sur l'axe vertical. Ainsi, l'adaptation d'un mouvement doit surtout faire attention à la modification de l'accélération horizontale des membres. Dans notre exemple, la différence maximale obtenue serait équivalente à la modification de la masse de l'humanoïde de 2.5 kg (en moins pour le modèle à 21 ddl), ce qui correspond à 4.5% de sa masse totale. L'influence de la projection du mouvement sur un modèle cinématique est donc relativement importante.

4.5.3 Influence de l'interpolation

Afin d'étudier l'influence de l'interpolation sur les changements physiques de mouvements adaptés, nous en observons les FRS lors de changements de paramètres locomoteurs. Nous étudions trois de ces paramètres que nous modifions indépendamment.

4.5.3.1 Longueur de pas

Dans cette section, nous étudions l'influence de la modification de la longueur de pas. Cette étude est utile, en particulier, pour évaluer les corrections de frottements des pieds d'appui, méthodes souvent utilisées dans les adaptations cinématiques. Ces corrections modifient principalement les trajectoires angulaires par une méthode en cinématique inverse mais peuvent également modifier la position des pieds, et donc la longueur de pas. Nous changeons la longueur initiale l_s en 8 nouvelles longueurs $l = \alpha \times l_s$ avec $\alpha \in [0.6, 1.3]$. Les FRS résultantes sont présentées en Figure 4.17(a) et les erreurs RMS cumulées en Figure 4.17(b).

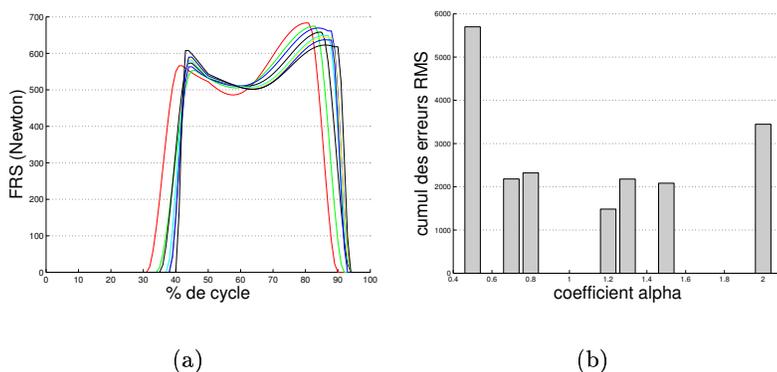


FIG. 4.17 – Influence de la longueur de pas. (a) Nous interpolons une locomotion avec 8 valeurs d' α : 0.5, 0.7, 0.8, 1.0, 1.2, 1.3, 1.5 et 2.0. (b) Les cumuls des erreurs RMS d'ordre 1 des FRS sont affichés en fonction des coefficients α .

Ces résultats montrent qu'autour de la locomotion de référence, les erreurs peuvent être considérées comme équivalentes. En effet, entre les coefficients 0.7 et 1.5, les erreurs RMS se situent entre $1.48e+03$ et $2.32e+03$, alors que hors de cet intervalle elles montent au dessus des $4.0e+03$. Le fait que l'on observe un palier autour de la locomotion de référence montre que la méthode d'interpolation corrige la locomotion pour un ensemble de longueurs de pas proches de celle de référence. La méthode d'interpolation utilise effectivement pour cela une base de données de locomotions, si cette base de données est assez hétérogène, le mouvement peut être adapté à n'importe quelle longueur de pas. Ici, nous constatons, que des longueurs de pas trop importantes (supérieures à 1.5 fois celle de référence) ou trop faibles (inférieures à 0.7 fois celle de référence) ne seront pas correctement prises en compte. Pour résoudre ce problème, il faudrait enrichir d'avantage la base de données avec un large échantillonnage de longueurs de pas.

4.5.3.2 Style de mouvement

Dans cette section, nous voulons changer le style de mouvement. Il existe plusieurs définitions du style d'un mouvement, mais ici, nous le définissons par le fléchissement des membres inférieurs, et nous le modélisons par le rapport entre la distance des pieds à la tête et la distance des pieds au bassin. Ce paramètre est un des paramètres de

l'interpolation, c'est pourquoi nous pouvons étudier directement son influence sur la dynamique. La locomotion normale de référence est définie comme ayant un pourcentage de fléchissement Pf de 1.0. Nous interpolons alors le mouvement pour 8 pourcentages $P = \theta \times Pr$ différents avec θ compris entre 0.8 et 1.15. Les FRS résultantes sont présentées en Figure 4.18(a) et les erreurs RMS cumulées en Figure 4.18(b).

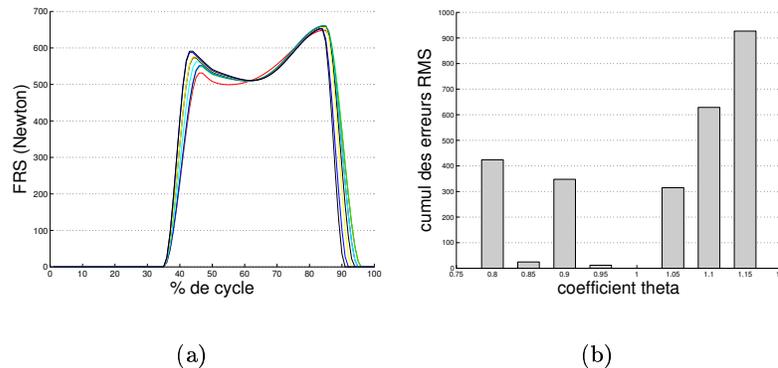


FIG. 4.18 – Influence du style de mouvement. (a) Nous interpolons une locomotion avec 8 valeurs θ : 0.8, 0.85, 0.9, 0.95, 1.0, 1.05, 1.1 et 1.15. (b) Les cumuls des erreurs RMS d'ordre 1 des FRS sont affichés en fonction des coefficients θ .

Si le mouvement est interpolé sur un style plus fléchi, les erreurs ne sont pas significatives. Par contre, l'interpolation sur un style de locomotion très redressé fait accroître l'erreur rapidement. Ce phénomène s'explique par l'impossibilité d'effectuer de grands pas avec une posture très droite. Si l'interpolation le force, il est normal qu'elle introduise des erreurs dans la dynamique du mouvement. La conclusion en est que l'interpolation est plus sûre lorsqu'elle est faite sur des styles plus fléchis car il y a alors des contraintes cinématiques moins fortes.

4.5.3.3 Vitesse de déplacement

Dans cette section, nous modifions la vitesse v_i de déplacement de l'humanoïde, en interpolant un mouvement à 8 vitesses $v = \gamma \times v_i$ avec $\gamma = 0.67$ à 1.33. Les FRS résultantes sont présentées en Figure 4.19(a) et les erreurs RMS cumulées en Figure 4.19(b).

Lorsque la vitesse décroît, l'erreur croît mais les caractéristiques physiques sont préservées. Lorsque la vitesse croît, l'amplitude de la double bosse d'appui croît jusqu'à des valeurs invalides. Ce qui signifie qu'à ce moment, le processus d'interpolation doit changer le mode de locomotion, par exemple pour une course, ce qui n'est pas géré dans notre approche.

4.6 Exemple d'application : transport de charges

Une des applications directes possibles à notre analyse en dynamique inverse est l'étude de l'influence de forces externes supplémentaires. En effet, nous pouvons appli-

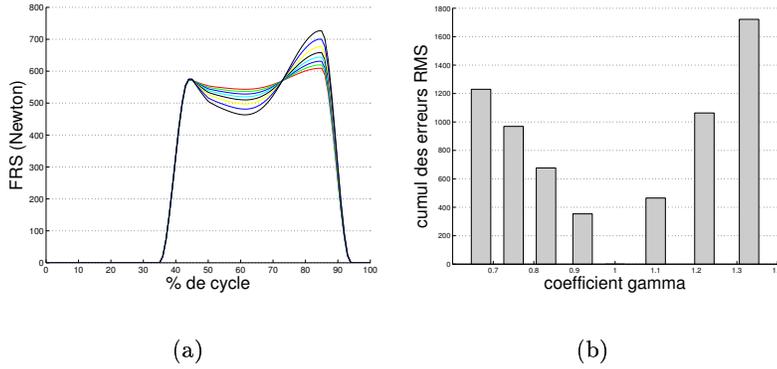


FIG. 4.19 – Influence de la vitesse de déplacement de l'humanoïde. (a) Nous interpolons une marche avec 8 valeurs γ : 0.67, 0.75, 0.83, 0.92, 1.0, 1.1, 1.22 et 1.33. (b) Les cumuls des erreurs RMS d'ordre 1 des FRS sont affichés en fonction des coefficients γ .

quer des actions externes sur n'importe quel membre et calculer les nouveaux torseurs nécessaires pour respecter rigoureusement le même mouvement. Ceci est une autre vision de l'utilisation de l'analyse en dynamique inverse, elle peut être utile pour des applications où le respect du mouvement est primordial ou bien pour étudier la propagation de l'influence d'une force externe.

Nous illustrons ici ce type d'application dans le cas où l'humanoïde transporte un poids de 30kg à la main gauche. En terme de torseur ceci équivaut à ajouter :

1. En translation : un poids correspondant à 30kg sur le dernier membre de la chaîne cinématique représentant le bras gauche, c'est-à-dire la main.

$$\overrightarrow{Poids_{main_{gauche}}} = \overrightarrow{Poids_{main_{gauche}}} + (30.0 \times -\vec{g}) \quad (4.13)$$

2. En rotation : un moment à l'extrémité de la main défini par le poids supplémentaire et la distance entre le point distal (point d'application de la force) et le point d'expression des moments qui est dans notre modèle le point proximal de la main.

$$\overrightarrow{C_{main_{gauche}}} = \overrightarrow{C_{main_{gauche}}} + (30.0 \times -\vec{g}) \wedge (\overrightarrow{Prox_{main_{gauche}}}, \overrightarrow{Dist_{main_{gauche}}}) \quad (4.14)$$

Un exemple de nouvelles forces nécessaires pour conserver un mouvement d'origine est donné en Figure 4.20 et sa visualisation en Figure 4.21.

Ce type d'étude montre quantitativement l'influence que peut avoir une force extérieure sur un système mécanique. Elle peut trouver un cadre applicatif dans des mesures de charges maximales appliquées à des systèmes aux couples moteurs bornés. Afin de valider l'étude qui concerne ici le transport de charge en bout de bras, il faudrait comparer les torseurs obtenus à des données expérimentales réelles. Or dans un système biomécanique comme celui de l'humain, nous avons naturellement tendance à équilibrer et répartir les forces internes pour des raisons physiologiques liées aux muscles et à leurs limites. Une locomotion normale et une locomotion avec charge seront différentes

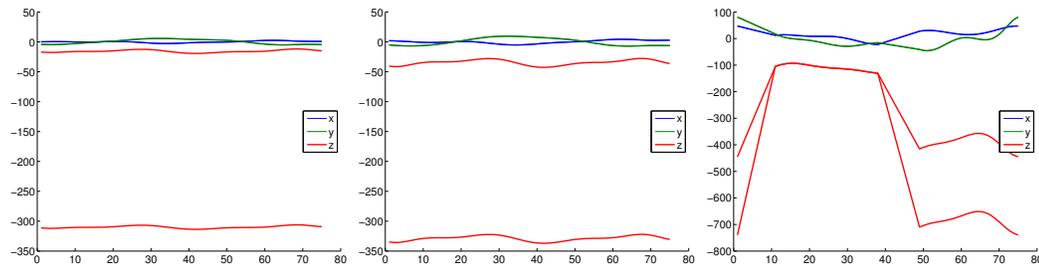


FIG. 4.20 – Forces nécessaires, au coude gauche, à l'épaule gauche et à la hanche gauche, à un transport de charge de 30kg conservant le mouvement d'origine. Seule l'amplitude de la force verticale z est réellement augmentée.

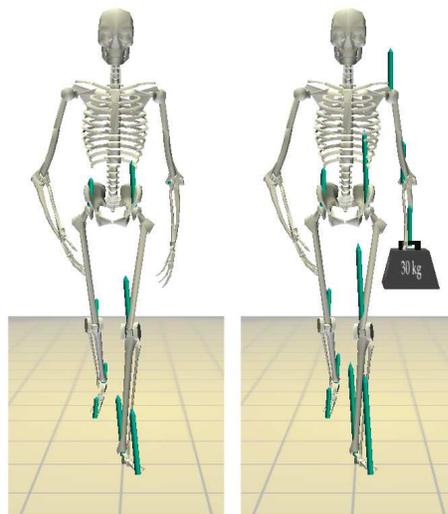


FIG. 4.21 – Comparaison des forces initiales et modifiées lors du transport de charge. Le poids supplémentaire influence essentiellement la dynamique du côté de la charge.

car la personne adaptera naturellement son mouvement à la nouvelle contrainte. Cette observation est une motivation supplémentaire à l'étude de la synthèse du mouvement humain en dynamique directe où cette adaptation peut être gérée.

4.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une méthode d'analyse en dynamique inverse de locomotions adaptées morphologiquement et interpolées avec comme but la validation de l'algorithme d'adaptation. Dans cette méthode, nous définissons d'abord le modèle de l'humanoïde par une représentation biomécanique du squelette. Cette représentation est créée par l'enrichissement d'un modèle mécanique du squelette en utilisant des tables anthropométriques et des lois de régression. La seconde étape consiste à définir un processus de transformation nous permettant de travailler avec un mouvement an-

gulaire. Finalement, en utilisant une reconnaissance des phases d'appui, nous vérifions l'exactitude des forces et moments avec une attention particulière portée aux forces de réaction au sol qui sont à la base de la validation.

Cette validation a été effectuée en fonction de paramètres morphologiques et locomoteurs. Le résultat principal de cette validation est que notre algorithme d'adaptation semble correct sur les intervalles étudiés. Mais pour être plus indicatif, des nouvelles données expérimentales et de nouvelles captures devraient être effectuées.

Le processus que nous avons présenté dans ce chapitre est automatique, générique et indépendant de la méthode d'adaptation. Ici, il est appliqué à des locomotions adaptées et interpolées, mais il peut être utilisé directement sur des mouvements réels ou bien mélangés par *blending* ou même édités. Nous présentons cette approche comme un post-processus d'analyse, mais la méthode utilisée peut être exécutée en temps réel pendant l'algorithme d'adaptation. Ainsi, nous pouvons prévoir d'implémenter notre analyse directement dans la méthode d'adaptation.

Une piste supplémentaire à explorer consisterait à essayer de surmonter les limitations habituelles de la dynamique inverse telles que la distribution uniforme de la masse des segments ou les frictions de l'air et des articulations. Nos perspectives pour ce travail sont d'orienter l'analyse et la synthèse de mouvements par les forces et moments par exemple pour de l'estimation de coût énergétique, pour de l'interpolation basée effort ou pour la reconnaissance et la classification de mouvements.

Chapitre 5

Synthèse par dynamique directe normalisée

La méthode de dynamique inverse présentée au chapitre précédent permet d'évaluer le réalisme physique d'une locomotion. Nous disposons, à l'issue de l'algorithme de résolution, des torseurs résultants du mouvement et en particulier les couples moteurs aux articulations. Nous allons dans ce chapitre étudier la possibilité d'utiliser ces torseurs ainsi que les efforts extérieurs pour synthétiser, en dynamique directe, un mouvement de locomotion.

Rappelons que l'un des objectifs de travail que nous nous sommes fixés est d'analyser et de synthétiser des mouvements à partir de modélisations normalisées c'est-à-dire indépendante des morphologies. Tout comme nous avons normalisé la base de données et le squelette lors de la synthèse par adaptation cinématique, nous définissons ici une normalisation des torseurs résultants pour une synthèse en dynamique directe. Cette normalisation est effectuée grâce aux caractéristiques physiques du squelette. L'idée proposée est d'associer les trajectoires normalisées de torseurs à un couple (personne, mouvement) et d'évaluer la pertinence des normalisations en déterminant les relations et les influences de ces trois entités.

Nous commençons donc, dans ce chapitre, par présenter la méthode de normalisation des torseurs (section 5.1). Ensuite nous exposons, en section 5.2, la méthode de dynamique directe que nous voulons employer pour synthétiser le mouvement.

5.1 Normalisation des torseurs

5.1.1 Cadre d'étude et questions

Notre but est d'étudier les relations entre les torseurs et les deux composantes du couple (personne, mouvement). Et en particulier répondre aux questions suivantes :

- Plusieurs mouvements d'un même type et d'une même personne donnent-ils bien des torseurs normalisés identiques ?
- Pour plusieurs mouvements différents d'une même personne, comment sont les

torseurs normalisés ?

- Pour un mouvement d'un type unique mais de plusieurs personnes, comment sont les torseurs normalisés ?
- Des mouvements différents de plusieurs personnes produisent-ils des torseurs normalisés très différents ?

Afin de répondre à ces questions il faut pouvoir déterminer lorsque des mouvements, des personnes et des torseurs peuvent être considérés comme identiques ou différents. Plusieurs méthodes d'évaluation statistiques qui peuvent nous aider dans cette tâche sont présentées en Annexe D. Par la suite nous les noterons ainsi :

- RMS(p) : la moyenne des erreurs RMS d'ordre p.
- M.E : la moyenne des distances Euclidiennes
- M.STDP : la moyenne des erreurs types de prévisions
- C.C : la moyenne des coefficients de corrélations
- C.ACP : la moyenne des coefficients de ressemblance des matrices d'ACP
- Deriv : la moyenne des dérivées premières par rapport au temps

Dans notre problème de normalisation des torseurs, les questions que nous nous posons sont du type : quand considère-t-on qu'un mouvement ou qu'un vecteur est identique à un autre ? Comme expliqué dans l'Annexe D, les méthodes d'évaluation métriques (RMS, M.E et M.STDP) donnent des évaluations de distances entre ensembles de valeurs. Les méthodes d'évaluation de ressemblance (C.C, C.ACP et Deriv) évaluent les évolutions des éléments des ensembles de valeurs. L'utilisation conjointe des deux types de méthodes nous permet de répondre aux questions que nous nous posons. En effet, elle permet alors à la fois de mesurer la distance en terme de valeur et la ressemblance en terme d'évolution. Dans la suite de ce chapitre, nous dirons donc que deux ensembles de valeurs (représentant des mouvements, des personnes ou des torseurs) sont proches lorsque les méthodes d'évaluations métriques donnent des valeurs faibles, ils seront distants sinon. De même deux ensembles seront dits ressemblants si les méthodes d'évaluation de ressemblance le démontrent.

5.1.2 Principes et résultats

Afin de juger la pertinence de la normalisation des torseurs, nous étudions dans cette section son comportement sur des mouvements connus. Les données des mouvements sont tout d'abord synchronisées sur un instant du cycle de locomotion : le début de l'appui du pied droit. Pour pouvoir comparer les ensembles de valeurs, nous étirons uniformément le temps (*time scaling* [CW99]) sur un cycle complet de locomotion, ce qui correspond à un étirement temporel dynamique (*dynamic time warping*) sur les deux points caractéristiques de début et de fin de cycle. Contrairement à certaines approches statistiques [CW99], nous n'effectuons ni de décalage en amplitude (*shifting*) ni de différence à la moyenne et de standardisation comme dans l'ACP, ceci afin de conserver les différences absolues des valeurs dans les calculs des méthodes métriques.

Prenons un mouvement de référence issu de notre base de données. Ce mouvement de référence est une locomotion où l'on a demandé au sujet (numéroté 1) de marcher de

manière normale (comme défini en section 3.3), notons cette locomotion $N_{1,1}$. Sélectionnons également une autre locomotion normale de la même personne, notée $N_{1,2}$ ainsi qu'une de ses locomotions fléchies notée F_1 . Maintenant, prenons la locomotion normale d'une autre personne (numéroté 2) notée N_2 ainsi qu'une de ses locomotions fléchies notée F_2 . L'étude qui suit a pour but de montrer le cadre de validité de la normalisation des torseurs pour ces mouvements (résumés en Table 5.1).

	Sujet 1	Sujet 2
normale	$N_{1,1}, N_{1,2}$	N_2
fléchie	F_1	F_2

TAB. 5.1 – L'étude du cadre de validité de la normalisation des torseurs est effectuée sur cet ensemble de 5 mouvements.

Pour être capable d'interpréter les résultats de l'étude, nous devons connaître les différences entre les morphologies des sujets. Pour cela nous avons choisi d'utiliser leurs masses et tailles globales puisque ce sont les paramètres représentatifs de la morphologie d'un squelette. Ces données étant de dimension 1, l'étude des méthodes présentées en Annexe D nous montre que la distance RMS d'ordre 1 (distance de Manhattan) est la mieux adaptée. Les résultats de ces évaluations nous montre que la taille du sujet 1 est de 174 cm à 1.2 cm près et que le sujet 2 est plus petit de 9.0 cm à 0.3 cm près. Les variations obtenues sur plusieurs locomotions d'une même personne sont dues au cumul des approximations de mesures du système de capture. Nous effectuons les mêmes estimations pour les masses, car elles ne dépendent pas forcément linéairement de la taille. En effet, les différences homme/femme et les différences entre masses relatives des membres font que pour une taille globale fixe, la masse totale de la personne peut être différente. Les résultats des évaluations montre que la masse du sujet 1 est de 74 kg à 0.7 kg près et que le sujet 2 est plus léger de 4.3 kg à 0.4 kg près. Pour rendre les torseurs indépendants de la morphologie nous utilisons ces valeurs de masses car elles sont les paramètres reliant les torseurs aux caractéristiques physiques (voir Équation 4.5).

Pour modéliser la distance entre les mouvements, nous nous intéressons au vecteur position de la racine située au milieu du bassin de l'humanoïde. Ce vecteur est caractéristique du mouvement et incorpore une variation importante, donc facilement évaluable, de sa composante verticale en fonction du type de locomotion (voir Figure 5.1). Nous observons, principalement sur cet axe vertical représentant l'altitude de la racine, que les mouvements de locomotions de type normal N sont proches. En effet, la distance entre les altitudes des locomotions normales du sujet 1 et de celle de N_2 s'explique par la différence de taille entre les deux personnes, la deuxième étant plus petite, les altitudes sont plus basses (visible autant sur N_2 par rapport aux N_1 que sur F_2 par rapport à F_1). De plus, nous pouvons noter que les locomotions de type fléchi F ont des amplitudes plus prononcées (grand mouvement du bassin lorsque l'on marche "comme un singe"). Ces différences doivent donc se ressentir à la fois sur la distance et sur la ressemblance, et nous allons maintenant chiffrer ces observations. Les distances, obte-

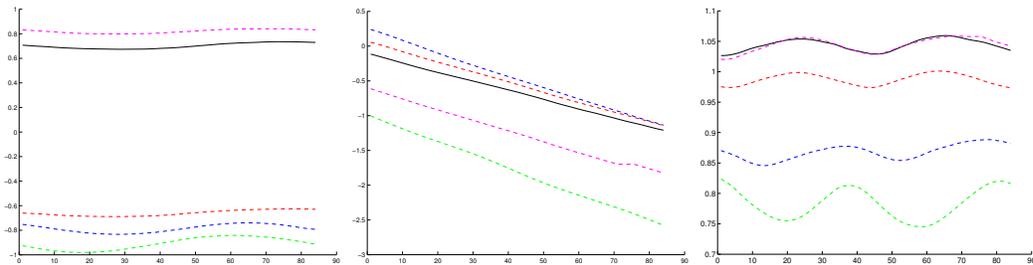


FIG. 5.1 – Composantes latérale, horizontale et verticale du centre du bassin. En noir $N_{1,1}$, en violet $N_{1,2}$, en bleu F_1 , en rouge N_2 et en vert F_2 . (En abscisse le temps en frames, et en ordonnée les positions 3D en mètres).

nues avec les méthodes d'estimation citées auparavant, entre le mouvement de référence $N_{1,1}$ et les autres mouvements sont présentées en Table 5.2.

	$N_{1,1}$	$N_{1,2}$	F_1	N_2	F_2
RMS(1)	0.0	0.234	0.621	0.512	1.001
M.E	0.0	0.026	0.068	0.056	0.109
M.STDP ($\times 10^{-3}$)	0.0	8.7	13.9	3.5	23.0
C.C	1.0	0.973	0.681	0.980	0.399
C.ACP	1.0	0.995	0.322	0.332	0.328
Deriv ($\times 10^{-4}$)	0.0	12.0	23.0	6.4	42.0

TAB. 5.2 – Distances et ressemblances des positions de la racine par rapport à celles de $N_{1,1}$.

Nos observations sont vérifiées. Les mouvements de type normal $N_{1,2}$ et N_2 sont moins distants et plus ressemblants que les mouvements fléchis F_1 et F_2 . Nous remarquons aussi que N_2 est plus distant mais plus ressemblant que $N_{1,2}$, ce qui nous prouve la propriété des méthodes de ressemblances qui se décorèlent des distances pures (méthodes RMS et M.E). Notons que la locomotion normale N_2 du deuxième sujet est plus proche que la locomotion fléchie F_1 , ce qui signifie que le mouvement de la racine dépend davantage du style de mouvement que de la personne. La marche fléchie F_2 du deuxième sujet est évidemment très éloignée et peu ressemblante par rapport au mouvement de référence $N_{1,1}$.

Pour illustrer la normalisation des paramètres physiques, nous appliquons maintenant une normalisation des FRS (forces de réaction au sol) appliquées au pied droit par la masse totale du sujet, paramètre morphologique le plus influent sur la dynamique. Ces FRS sont présentées en Figure 5.2. Comme nous l'avons constaté sur les mouvements, les FRS normalisés les plus proches de celles de référence sont celles issues du même type de locomotion : normal. Mais par contre, pour ces dernières, les différences entre $N_{1,1}$, $N_{1,2}$ et N_2 sont faibles. Leurs évaluations effectives suivant les mêmes méthodes

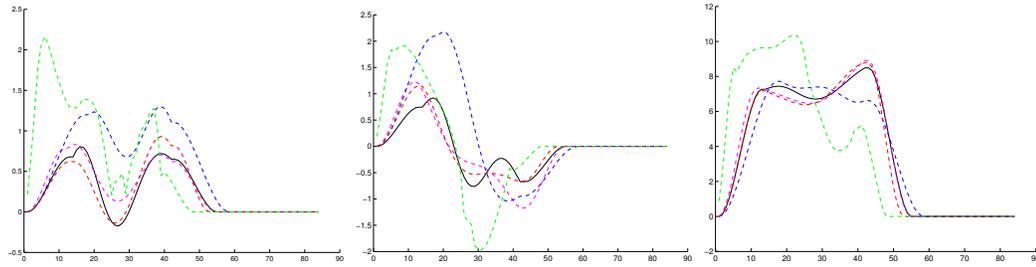


FIG. 5.2 – Composantes latérale, horizontale et verticale des FRS normalisées appliquées au pied droit. En noir $N_{1,1}$, en violet $N_{1,2}$, en bleu F_1 , en rouge N_2 et en vert F_2 .

précédemment utilisées sont données en Table 5.3.

	$N_{1,1}$	$N_{1,2}$	F_1	N_2	F_2
RMS(1)	0.0	0.150	0.426	0.141	0.946
M.E	0.0	0.025	0.071	0.026	0.148
M.STDP ($\times 10^{-2}$)	0.0	22.6	55.6	22.9	129.3
C.C	1.0	0.938	0.826	0.954	0.702
C.ACP	1.0	0.945	0.848	0.962	0.802
Deriv ($\times 10^{-3}$)	0.0	36.5	74.1	37.3	162.2

TAB. 5.3 – Distances et ressemblances des FRS appliquées au pied droit par rapport à celles de $N_{1,1}$.

Le résultat le plus important est donné par les valeurs obtenues pour le mouvement N_2 . Bien qu'assez distant en terme de mouvement, sa ressemblance aux FRS normalisées de référence est tout à fait comparable à celles de $N_{1,2}$. Des FRS normalisées provenant de deux personnes sont donc comparables à celles d'une même personne pour des styles de locomotion identiques. Sur notre ensemble restreint de locomotions, cela montre la validité d'utiliser des normalisations sur ces mouvements. Par contre, nous ne pouvons pas affirmer que la normalisation est valide sur l'ensemble des locomotions possibles d'un même style. Les comparaisons avec d'autres locomotions, toute notre base de données par exemple, pourrait déjà apporter des réponses plus précises à ce sujet. Mais dans tous les cas, nous comprenons maintenant que la définition d'un style de mouvement peut être reliée à la notion de ressemblance. Et les résultats obtenus pour les locomotions F_1 et F_2 montrent de plus, dans notre exemple, que si deux mouvements sont de styles différents, leurs FRS normalisées sont différentes. Nous pouvons supposer que cela reste correct de manière plus générale, puisque les amplitudes des FRS sont dépendantes des amplitudes du mouvement qui sont elles mêmes dépendantes du style de mouvement.

5.2 Méthode de dynamique directe

Le principe de synthèse du mouvement par le pilotage des torseurs peut se résoudre par des méthodes du type dynamique directe. La mécanique des solides, que ce soit des corps rigides ou des corps déformables, apporte en effet une réponse au problème de la réalisation de mouvements naturels dont les causes sont dictées par des torseurs. Ceci nous a conduit à utiliser des modèles scientifiques de résolutions mécaniques. Nous utilisons la librairie NMECAM [Arn89, Dum90, Dum91] qui est une librairie de calcul symbolique optimisée pour la mécanique des solides rigides. NMECAM simule le comportement dynamique de système de corps rigides polyarticulés. Cette librairie peut engendrer le code numérique d'un simulateur dédié au mécanisme étudié. Les équations du mouvement sont automatiquement calculées sous forme symbolique à partir de la description haut niveau du mécanisme (voir Figure 1.5). Seules quelques connaissances sont nécessaires à la définition du système (voir Figure 5.4) :

1. L'état initial du système. Tous les paramètres du système, c'est-à-dire les degrés de libertés en rotation des articulations plus les degrés de libertés en translation globale du personnage, doivent être initialisés afin que l'algorithme de résolution prenne compte des leurs accélérations. Cet état est défini grâce aux positions, vitesses et accélérations calculées lors de l'analyse en dynamique inverse.
2. Les forces extérieures. Dans un mouvement de locomotion, ces forces sont la gravité et les FRS (les forces aérodynamiques étant négligeables). La gestion de la gravité est effectuée par la librairie de dynamique directe. Les FRS sont évalués par l'algorithme de dynamique inverse présenté au chapitre précédent. Elles sont appliquées, à chaque pas de temps de la résolution, aux centres de gravité des pieds. Ceci peut entraîner des problèmes de moments résultants à la cheville (la distance du bras de levier étant fixe), il faudrait alors envisager d'appliquer les forces suivant un tracé de pression au sol, données disponibles dans la littérature (voir Figure 5.3).

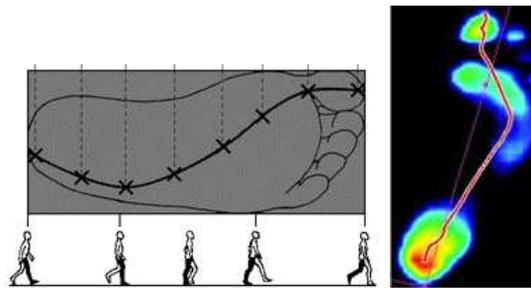


FIG. 5.3 – Tracés de pression sur le pied droit durant une phase d'appui [PRE06]

3. Les couples moteurs aux articulations. Issus de la dynamique inverse, les couples moteurs simulent l'activité des muscles.
4. Le système mécanique. Le système mécanique est composé de la description des corps (masses, inerties et matrices de passages) et de la description des liaisons

entre les corps (type, raideur, amortissement, ...). Ces paramètres sont également directement exportables depuis notre module d'analyse en dynamique inverse.

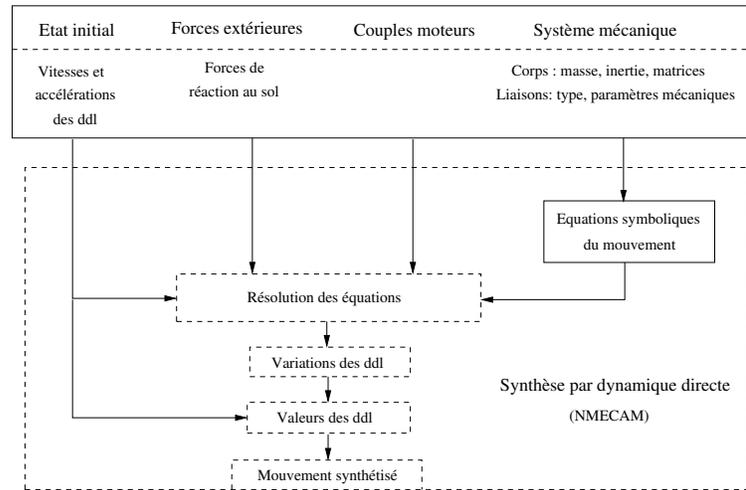


FIG. 5.4 – Principe de fonctionnement de la synthèse en dynamique directe (détail de la Figure 1.5).

5.2.1 Propriétés caractéristiques

Quelques propriétés supplémentaires doivent faire l'objet d'une attention particulière. Elles sont en générale dépendante de la méthode de résolution utilisée et de paramètres de cette dernière tels que le pas de temps ou la tolérance relative de la résolution. Un phénomène est en particulier observé dans les méthodes de dynamique directe utilisant des résolutions d'équations non linéaires par la méthode de Newton-Raphson.

Le principe de cette méthode itérative est le suivant. À chaque pas de temps t , le but est de trouver les variations ΔX des paramètres X (N degrés de liberté) du système en fonction de la configuration actuelle (via sa Jacobienne J) et des équations du mouvement f associées (prenant en compte forces extérieures, torseurs internes, ...). Ainsi l'objectif de la méthode est de résoudre à chaque pas de temps les N équations :

$$J \times \Delta X + f = 0 \quad (5.1)$$

La résolution se fait de manière itérative, dont la condition d'arrêt est l'obtention de valeurs ΔX négligeables (inférieures à un seuil ε_{resol}) :

```
FAIRE
  évaluation des  $f(X)$  ;
  évaluation de la Jacobienne  $J$  ;
   $\Delta X = \text{résolution\_LU}(J, f(X))$  ;
   $X = X + \Delta X$  ;
TANT QUE ( $\Delta X > \varepsilon_{resol}$ )
```

La méthode classique de résolution utilise une décomposition LU de la matrice J . Cette décomposition consiste à trouver une matrice L triangulaire inférieure et une matrice U triangulaire supérieure dont le produit soit égal à J . Puis la méthode calcule les ΔX du système linéaire à partir des deux matrices L et U en effectuant une substitution avant sur L puis une substitution arrière sur U .

Dans le cadre de ce principe de résolution, la librairie mécanique offre la possibilité d'ajouter des ressorts et des amortisseurs aux liaisons. Ces paramètres sont à utiliser si la méthode de dynamique inverse qui a permis de déterminer les torseurs, les incorpore dans son modèle. En effet, dans le cas contraire, ceci introduirait un biais dans le mouvement calculé. Nous énonçons donc, dans la suite, des propriétés valides dans ce cadre. La spécification des liaisons ajoute, dans les équations du mouvement f , des contraintes sur le mouvement correspondant à ces nouvelles propriétés. Une question se pose alors : comment régler les valeurs de longueur et de raideur du ressort ainsi que du coefficient d'amortissement ?

Le ressort est défini à partir de la liaison ponctuelle, donc sa longueur à vide est nulle. Toute la difficulté pour fixer des valeurs de raideur et d'amortissement est de trouver un compromis avec le respect du mouvement original, donné par les couples moteurs. En effet, plus les raideurs et amortissements sont importants plus le mouvement est contraint, donc à forces motrices égales le mouvement aura moins d'amplitude. Nous rappelons ici que les ressorts contraignent le mouvement en position et les amortisseurs le contraignent en accélération. Il est donc plus intéressant, au niveau du compromis, d'utiliser des amortisseurs que des ressorts. Nous avons constaté de manière empirique que les liaisons à peu de degrés de liberté (liaison pivot) étaient moins sensibles aux perturbations numériques (la jacobienne étant plus simple, c'est-à-dire avec plusieurs termes nuls). Les degrés de liberté en translation (dans les liaisons libres) ne doivent eux pas être contraint si on veut respecter un minimum le mouvement. Nous avons donc défini une règle empirique qui applique une raideur et un coefficient d'amortissement à des liaisons rotules. Le degré de liberté correspondant aux flexions/extensions est responsable de la majorité d'un mouvement de locomotion, nous en avons donc réduit la raideur et l'amortissement. Comme nous l'avons vu précédemment, la capacité d'un système biomécanique à se mouvoir est définie par les inerties des corps le composant. Nous avons donc paramétré cette règle par ces données physiques (voir Table 5.4).

	flex/ext	abd/add	rot int/ext
raideur	$I_x \times 0.1$	$I_y \times 2.0$	$I_z \times 2.0$
amortissement	$I_x \times 0.2$	$I_y \times 5.0$	$I_z \times 5.0$

TAB. 5.4 – Raideurs et amortissement d'une liaison rotule motrice d'un corps d'inertie d'axe principal $[I_x, I_y, I_z]$.

Le second phénomène que nous jugeons important d'aborder ici concerne la résolution de l'application de forces motrices. Nous allons l'illustrer sur un exemple simple : le

pendule. Le système mécanique est constitué d'un corps de masse m , le longueur $l = 2$ mètres et d'inertie $[I_x, I_y, I_z]$ en son centre de gravité G . Ce corps est lié par l'une de ses extrémités au monde fixe par une liaison pivot d'axe \vec{y} . Il est placé en position initiale de manière horizontale, orienté vers l'axe \vec{x} positif, et avec une vitesse nulle. Le mouvement de balancier est donc effectué dans le plan (\vec{x}, \vec{z}) . Notre but est de calculer, par dynamique inverse, les couples moteurs nécessaires pour effectuer un mouvement précis, puis de piloter la dynamique directe par ces couples afin de retrouver le mouvement. Le mouvement que nous imposons au système consiste à lâcher le corps au temps $t = 0$, à laisser le mouvement pendulaire s'effectuer pendant 5 secondes, puis à bloquer la position du pendule (ce qui équivaut à appliquer sur la liaison une force motrice constante compensant la gravité) pendant les 5 secondes restantes (voir Figure 5.5).

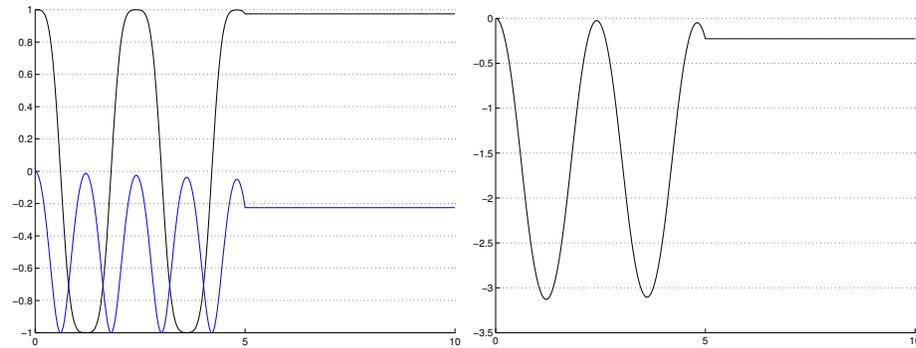


FIG. 5.5 – Coordonnées (x en noir, z en bleu) du centre de gravité G d'un pendule simple. Pour $t > 5$ le pendule est contraint en position. À droite : l'angle pivot d'axe \vec{y} correspondant.

Un calcul en dynamique inverse nous donne le couple moteur indiqué en Figure 5.6. Nous pouvons observer que le moteur est inactif (valeur nulle) pendant les 5 premières

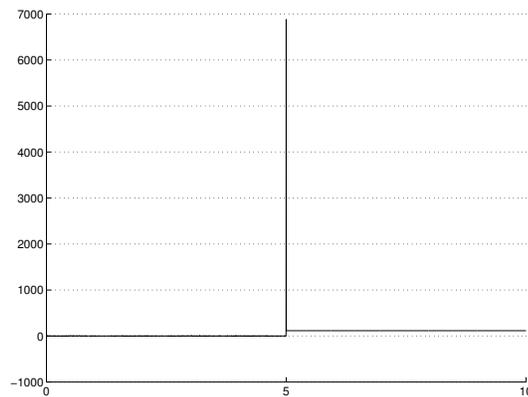


FIG. 5.6 – Couple moteur (en N.m) nécessaire pour contraindre le mouvement.

secondes, ce qui correspond bien au mouvement de balancier uniquement du à la gravité.

À $t = 5$, nous observons un pic de la valeur du couple. En effet, le pendule doit s'arrêter net, la vitesse du corps tend vers 0 très rapidement, la décélération est très grande, le couple moteur bloque le mouvement par un pic de force "ponctuel" dont l'amplitude dépend surtout de l'inertie du corps. Dans la suite du mouvement, le pendule doit être stable, le couple moteur nécessaire est constant dont la valeur correspond à la compensation de la gravité appliquée en G donc déterminée par la masse du corps.

Nous allons maintenant appliquer ce couple moteur au système, en utilisant la librairie NMECAM, dans les mêmes conditions initiales. L'angle de la liaison pivot obtenu est donné en Figure 5.7.

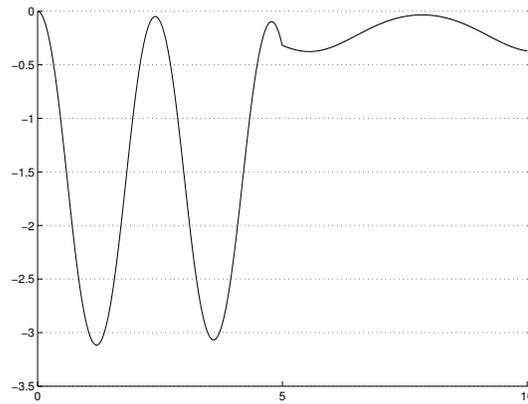


FIG. 5.7 – Angle de la liaison pivot issue de la simulation en dynamique directe pilotée par le couple moteur de la Figure 5.6.

La résolution de la première partie de la simulation correspond parfaitement au mouvement initial. Le pic de force à $t = 5$ est correctement pris en compte puisque nous observons que la vitesse de l'angle s'annule pratiquement. Par contre, le phénomène que nous voulons montrer apparaît dans la seconde partie de la simulation. Bien que la valeur du couple moteur soit constante, l'angle obtenu ne l'est pas, mais oscille autour de la valeur théorique (problème d'intégration numérique au temps t exact de la contrainte en position). Ces oscillations, sur des systèmes plus complexes, se cumulent et peuvent à terme (extrémité d'une chaîne cinématique) créer des mouvements incorrects.

Notons également que l'utilisation de lissages (par exemple par polynômes ou splines) des valeurs des positions ou des angles, est très fortement déconseillée. En effet, de tels lissages produisent des vitesses et accélérations continues (généralement en C^2 uniquement) qui ont de grandes chances "d'effacer" les pics de forces motrices (dus aux décélération et accélérations rapides). Un calcul des vitesses et accélérations par différences finies est alors conseillé.

5.2.2 Validation par les morphologies et par les torseurs normalisés

Le principe de validation que nous proposons repose sur deux idées. Il s'agit en premier lieu de vérifier que le mouvement produit par dynamique directe avec les tor-

seurs correspondant est identique au mouvement original. La deuxième partie concerne la validation du principe de normalisation des torseurs. Il s'agit de vérifier que des torseurs normalisés puis "renormés" par les caractéristiques physiques de l'humanoïde produisent un mouvement proche de l'original. En résumé, nous avons déjà vérifié que n mouvements de même type correspondent à n torseurs normalisés identiques, il faudrait maintenant regarder si 1 torseur renormé "moyen" produit les n mouvements originaux (voir Figure 5.8).

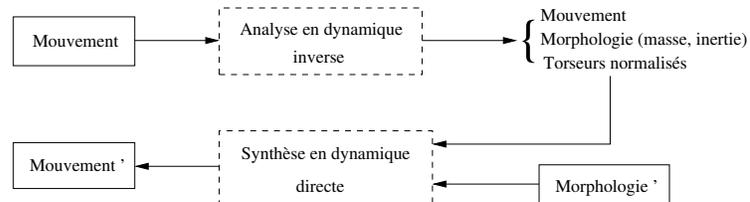


FIG. 5.8 – Principe de validation de la dynamique inverse/directe normalisée. Un mouvement analysé fournit des informations sur le mouvement, sur la morphologie et sur les torseurs. Après normalisation, ces torseurs pilotent la synthèse en dynamique directe sur un modèle mécanique avec des propriétés morphologiques différentes. Comment est le mouvement obtenu par rapport à ceux capturés sur les deux humanoïdes utilisés ?

5.2.3 Résultats préliminaires sur l'humain

Nous avons appliqué les principes précédemment décrits de normalisation des torseurs et d'algorithmes de dynamique directe sur l'humain dans un cadre simplifié.

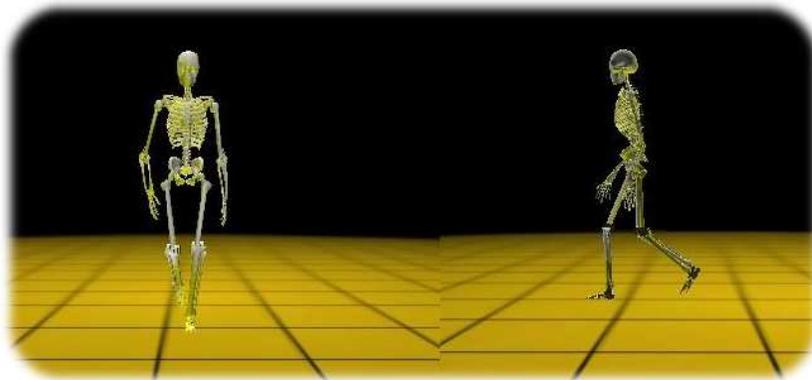


FIG. 5.9 – Extrait d'une simulation en dynamique directe sur l'humain. Le mouvement synthétisé en dynamique directe, représenté par le squelette gris, est très proche du mouvement cinématique original, représenté par le squelette jaune.

Pour ce faire, nous analysons et synthétisons une locomotion humaine comme étant la combinaison des mouvements indépendants de ses segments. Les membres du squelette sont analysés indépendamment (résolution isolée, sans effort externe autre que la

gravité), puis les torseurs obtenus sont utilisés pour synthétiser, par dynamique directe, une locomotion sur un autre, ou le même, personnage (voir Figure 5.9).

L'étape suivante, non implémentée à ce jour, consiste à mettre en place une résolution sur tout le corps humain articulé.

5.3 Conclusion

Nous n'avons pas pu mettre en œuvre la totalité des principes proposés ici. Néanmoins, nous avons pu tester de nombreuses configurations de systèmes mécaniques, et observer plusieurs phénomènes nous permettant d'appréhender le fonctionnement d'une synthèse en dynamique directe d'un corps humain. L'approche proposée de normalisation des paramètres physiques du mouvement nous paraît prometteuse en particulier au vue de ses applications. En effet, les approches d'adaptations cinématiques et cinétiques ont en général un besoin d'informations dynamiques pour compléter leurs calculs. Le fait de pouvoir accéder, par exemple, à un profil des forces de réaction au sol ou de torseurs aux genoux, automatiquement adaptés à la morphologie, pour un type de locomotion donné, est une information qui peut être profitable à de nombreux algorithmes d'adaptation.

Conclusion et perspectives

Les travaux présentés dans cette thèse concerne **l'étude de l'humain** par des méthodes **d'analyse** et **de synthèse** de ses mouvements. Ces méthodes soulèvent des problèmes cruciaux dans de nombreux domaines scientifiques tels que la biomécanique, l'anthropologie ou l'animation. Nos travaux proposent une chaîne complète d'analyse et de synthèse de locomotions humaines.

Cette chaîne est composée des éléments suivant :

- Une méthode **d'adaptation cinématique** basée sur une normalisation morphologique d'une base de données de mouvements et sur un algorithme d'interpolation dimensionnelle.
- Un procédé de **validation de méthode d'adaptation** basé sur l'étude, par dynamique inverse, de son influence sur la physique des mouvements adaptés.
- Une méthode de **synthèse en dynamique directe** de locomotions pilotée par des torseurs normalisés.

La méthode d'adaptation cinématique présentée est la composition d'une méthode **d'adaptation morphologique** et d'un algorithme d'**interpolation**. L'adaptation morphologique permet de produire des locomotions plausibles en fonction de paramètres tels que les longueurs des segments ou les degrés de liberté des liaisons articulaires. L'interpolation dimensionnelle mélange des mouvements de la base de données suivant les paramètres locomoteurs les plus influents de chaque axe anatomique : la longueur de pas, l'écartement des pieds et la posture de repos. Notre méthode produit ensuite, par une méthode en **cinématique inverse**, une locomotion respectant des contraintes biomécaniques telles que les butées articulaires, la posture de repos et la minimisation de la dépense énergétique. Nous proposons des résultats d'applications sur des **données paléanthropologiques** sur le squelette de l'australopithèque Lucy. Le travail en collaboration avec les paléanthropologues du Projet ATIP ont donnés lieu à des résultats leurs permettant de valider ou d'étayer des hypothèses quand à la bipédie de cet australopithèque.

Notre focalisation sur les mouvements de marche dans cette partie de nos travaux, a l'avantage a nous permettre d'évaluer précisément la méthode d'adaptation morphologique et d'interpolation. Cette spécialisation est en partie due à la représentation de mouvement que nous utilisons ainsi qu'au profil de vitesse moyen et qu'au principe de l'interpolation dimensionnelle. Afin d'obtenir une meilleure généralité de nos algorithmes,

il serait intéressant d'étudier la possibilité d'effectuer des interpolations dimensionnelles sur un type quelconque de mouvement. Ceci serait sans doute possible en regardant les paramètres influents sur les 3 axes principaux d'une décomposition en ACP. Une plus grande **diversité de la base de données** serait également à envisager. En effet, plus la base de données est grande, plus les interpolations sont faibles, donc plus les risques d'erreurs sont faibles. Ceci est en particulier vrai si l'on souhaite synthétiser un mouvement avec des contraintes morphologiques et locomotrices très différentes de celles capturées, comme par exemple avec des données de singe. De plus, pour obtenir encore d'avantage de généralité, il serait intéressant d'augmenter les possibilités des modèles mécaniques, et en particulier des liaisons. Ceci afin, par exemple, de pouvoir modéliser et adapter les mouvements d'un système articulaire complexe tel que le genou ou l'épaule. La minimisation locale de la méthode de cinématique inverse est aussi à étudier ainsi que de nouvelles tâches secondaires. En effet, avec un critère de minimisation d'énergie, certains degrés de liberté sont parfois sous utilisés, ce qui a pour conséquence de produire des artefacts dans le mouvement. Une minimisation globale permettrait de prévenir ce type de comportement.

La validation de la méthode d'adaptation proposée dans ce mémoire se focalise sur les **modifications de la dynamique** dans les mouvements adaptés. Dans cette approche, nous créons automatiquement une représentation biomécanique de l'humanoïde. Elle est basée sur une notation issue du domaine de la robotique et sur l'utilisation des tables anthropométriques moyennes et de lois de régression. Les paramètres physiques de l'humanoïde sont ainsi adaptés à sa morphologie et à son sexe. Nous réalisons alors, par dynamique inverse, le calcul des **torseurs aux articulations** nécessaires pour effectuer le mouvement. Ce calcul est basé sur le principe fondamental de la dynamique, et passe par l'évaluation des phases d'appui de l'humanoïde sur le sol et la représentation du mouvement de manière angulaire. Les torseurs obtenus, et en particulier les forces de réaction au sol, sont les caractéristiques dynamiques qui nous servent à l'évaluation des intervalles de validité de la méthode d'adaptation. Nous présentons des résultats de validation sur notre méthode d'adaptation cinématique tout en séparant l'influence de l'adaptation morphologique et l'influence de l'interpolation.

Notre méthode estime la manière dont l'algorithme d'adaptation modifie la dynamique des mouvements. Nous avons pu valider les résultats obtenus sur les intervalles de travail. Mais il y a une différence entre la manière dont évolue la modification de la dynamique d'un mouvement et la dynamique réelle de ce mouvement. Nous avons, à chaque fois que nous l'avons pu, comparé les résultats à des données réelles, mais ceci n'est pas suffisant pour certifier que la méthode d'adaptation est valide quelque soit les contraintes imposées. Il faudrait pour cela obtenir **plus de données expérimentales** telles que des mesures réelles de couples moteurs ou d'avantage de forces de réaction au sol. La méthode de dynamique inverse elle-même peut être améliorée afin de prendre en compte davantage de **phénomènes biomécaniques**. Le calcul d'efforts aérodynamiques, l'influence de frottements articulaires ou l'activation musculaire font partie de ces phénomènes.

L'un des objectifs de travail que nous nous sommes fixés est d'analyser et de synthétiser des mouvements à partir de modélisations normalisées. La méthode de **normalisation de torseurs et de forces extérieures** que nous envisageons entre tout à fait dans cette optique. Elle est effectuée grâce aux paramètres morphologiques de l'humanoïde et représente ainsi des profils adimensionnés de la dynamique d'un mouvement. Les pistes que nous donnons sur la **synthèse par dynamique directe** nous permet de mettre en relief les difficultés et les verrous scientifiques d'une telle approche lorsqu'elle est appliquée sur un système mécanique complexe tel que l'humain. Les perspectives de recherche dans ce domaine sont nombreuses, allant de l'animation cinématique couplée avec des interactions physiques à la simulation dynamique basée sur l'activité musculaire.

La chaîne complète d'analyse et de synthèse de mouvements de locomotions que nous proposons nous a permis de mieux comprendre les phénomènes mécaniques, biomécaniques et dynamiques mis en jeu. Le principe global que nous avons présenté permet de manipuler un processus stable et cohérent de la boucle analyse/synthèse. Les trois principales parties de cette thèse sont complémentaires et indépendantes. Elles peuvent chacune être combinées avec d'autres méthodes d'adaptation, d'analyse de la dynamique et de synthèse. Une des pistes les plus intéressantes serait par conséquent d'appliquer nos méthodes sur d'autres approches complémentaires.

Annexe A

Courbes de Coons paramétrée

Une courbe de Coons, aussi appelée interpolation d'Hermite, est une courbe polynomiale cubique. Cette courbe est déterminée par des contraintes aux points extrêmes et aux tangentes vectorielles en ces mêmes points.

Pour trouver la matrice de base hermitienne M_h , on écrit quatre équations, une pour chacune des contraintes, avec les coefficients polynomiaux inconnus, et ensuite on résoud selon les inconnues.

Nous avons donc la courbe de Coons $C(t)$ définie par :

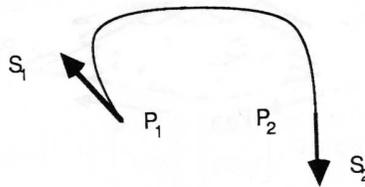


FIG. A.1 – Courbe de Coons

$$C(t) = [t^3 \ t^2 \ t \ 1]M_3$$

et

$$C'(t) = [3t^2 \ 2t \ 1 \ 0]M_3$$

et les conditions :

$C(0) = P_1$ (1er point extrême)

$C(1) = P_2$ (2ème point extrême)

$C'(0) = S_1$ (tangente au 1er point)

$C'(1) = S_2$ (tangente au 2ème point)

permettent d'évaluer M_3 :

$$\begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ S_1 \\ S_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 3 & 2 & 1 & 0 \end{bmatrix} M_3$$

d'où

$$M_3 = \begin{bmatrix} 2 & -2 & 1 & 1 \\ -3 & 3 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ S_1 \\ S_2 \end{bmatrix} = M_h \cdot G_h$$

M_3 peut maintenant être utilisé dans $C(t) = [t^3 \ t^2 \ t \ 1]M_3$ pour trouver les coordonnées de n'importe quel point sur la courbe via le paramètre t variant de 0 à 1.

Annexe B

Profil de vitesse et abscisse curviligne

La Figure B.1 représente le profil de vitesse moyen utilisé. La surface de la partie grisé est égale à l'abscisse curviligne du point correspondant sur la poulaine. Notons t

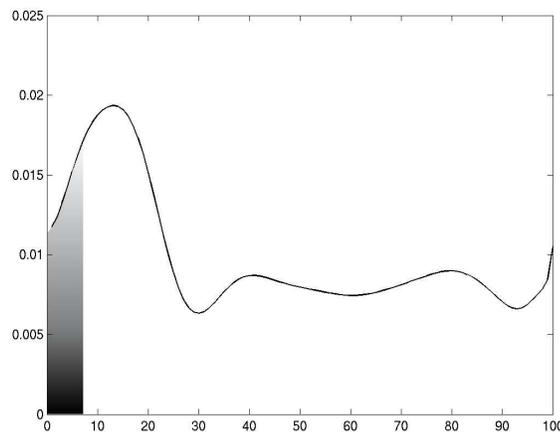


FIG. B.1 – Profil de vitesse et abscisse curviligne.

le pas de temps voulu par l'utilisateur, $S(t)$ l'abscisse curviligne correspondante. $S(t)$ peut être obtenue par calcul intégral sur la courbe mais également en passant par un calcul analytique. En effet si l'on modélise la courbe de vitesse par un polynôme de degré élevé (22 dans notre cas) :

$$V(x) = a_{22}.x^{22} + a_{21}.x^{21} + \dots + a_1.x + a_0$$

En intégrant ce polynôme :

$$I_V(x) = S(x) = \frac{a_{22}}{23}.x^{23} + \frac{a_{21}}{22}.x^{22} + \dots + \frac{a_1}{2}.x^2 + a_0.x + 0$$

Le dernier terme vaut 0 car la distance parcourue est nulle au départ. Ce polynôme représente effectivement la distance parcourue sur la courbe, c'est à dire l'abscisse curviligne.

Notons u le paramètre de courbe cubique.

Nous avons :

$$\begin{Bmatrix} x(u) \\ y(u) \\ z(u) \end{Bmatrix} = [u^3 \quad u^2 \quad u \quad 1]M_3$$

et

$$S(t) = \int_0^u \sqrt{\frac{dx^2}{du} + \frac{dy^2}{du} + \frac{dz^2}{du}}$$

Donc

$$S(t) = \int_0^u \left[[3u^2 \quad 2u \quad 1 \quad 0]M_3M_3^T[3u^2 \quad 2u \quad 1 \quad 0]^T \right]^{\frac{1}{2}} du$$

Connaissant $S(t)$ par calcul polynomial, nous pouvons donc ensuite calculer le u le plus proche (par itération ou recherche dichotomique) pour tout pas de temps t .

Annexe C

Statistiques des reconnaissances d'appui au sol

Les quatre configurations de chaînes cinématiques testées possèdent comme dernières articulations : *l'orteil et le talon*, *l'orteil et la cheville*, *le talon seul* et *la cheville seule*. Les résultats des évaluations des différents critères présentés en section 4.3 et les résultats des seuils obtenus sont donnés dans les tables ci-dessous. Les méthodes sont classées par ordre décroissant de qualité pour chaque critère. La qualité est établie en comparaison avec la méthode de référence *visuelle*. Nous évaluons ces méthodes sur 12 locomotions, donc sur $12 \times 2(\text{gauche-droite}) \times 2(\text{flexion-extension}) = 48$ contacts.

Les valeurs moyennes des seuils en amplitude sont exprimées en pourcentage d'élévation maximale du pied durant un cycle. Les valeurs moyennes des seuils en vitesse sont exprimées en mètre par seconde.

critère/rang	1	2	3
Nombre d'échecs	(0) vitesse	(0) config	(16) amplitude
Erreur moyenne	(2.3) vitesse	(5.6) amplitude	(9.7) config
S.D.	(1.6) vitesse	(2.1) config	(2.4) amplitude
S.D. norm.	(-) config	(0.41) amplitude	(0.50) vitesse

TAB. C.1 – Classement pour la configuration orteil et talon.

	posé de talon	levé d'orteil
<i>amplitude (%)</i>	13.0	13.37
<i>vitesse (m/s)</i>	0.73	0.39

TAB. C.2 – Valeurs moyennes des seuils pour la configuration orteil et talon.

critère/rang	1	2	3
Nombre d'échecs	(2) vitesse	(14) config	(48) amplitude
Erreur moyenne	(3.6) vitesse	(13.0) config	(-) amplitude
S.D.	(4.0) vitesse	(4.7) config	(-) amplitude
S.D. norm.	(-) config	(1.28) vitesse	(-) amplitude

TAB. C.3 – Classement pour la configuration orteil et cheville.

	posé de talon	levé d'orteil
<i>amplitude (%)</i>	-	-
<i>vitesse (m/s)</i>	0.82	0.52

TAB. C.4 – Valeurs moyennes des seuils pour la configuration orteil et cheville.

critère/rang	1	2
Nombre d'échecs	(2) vitesse	(2) amplitude
Erreur moyenne	(2.7) vitesse	(11.4) amplitude
S.D.	(1.7) vitesse	(4.25) amplitude
S.D. norm.	(0.15) amplitude	(0.68) vitesse

TAB. C.5 – Classement pour la configuration talon seul.

	posé de talon	levé d'orteil
<i>amplitude (%)</i>	5.41	49.83
<i>vitesse (m/s)</i>	0.73	1.66

TAB. C.6 – Valeurs moyennes des seuils pour la configuration talon seul.

critère/rang	1	2
Nombre d'échecs	(4) vitesse	(14) amplitude
Erreur moyenne	(2.9) vitesse	(6.2) amplitude
S.D.	(3.0) amplitude	(3.1) vitesse
S.D. norm.	(0.51) amplitude	(0.79) vitesse

TAB. C.7 – Classement pour la configuration cheville seule.

	posé de talon	levé d'orteil
<i>amplitude (%)</i>	14.11	45.67
<i>vitesse (m/s)</i>	0.77	1.35

TAB. C.8 – Valeurs moyennes des seuils pour la configuration cheville seule.

Annexe D

Quelques méthodes d'évaluation statistiques

Le problème de l'évaluation de la distance entre deux ensembles de valeurs est un problème classique dans le domaine de la statistique. En animation, nous retrouvons cette problématique par exemple lorsque nous voulons comparer deux mouvements ou deux squelettes. En effet, ces entités sont généralement modélisées comme des ensembles de valeurs. Un mouvement est ainsi souvent modélisé par les trajectoires angulaires aux articulations et la position de la racine du squelette, et un squelette par les données cinématiques et physiques de ses membres. Comparer des mouvements, des squelettes ou bien des torseurs se ramène bien à un problème de statistique de distance entre ensembles de valeurs dont le point crucial est de déterminer une métrique fiable.

Dans le domaine de l'animation plusieurs métriques ont été proposées, généralement pour déterminer le naturel d'une animation modifiée. La métrique s'établit alors entre cette animation modifiée et une ou plusieurs animations réelles. Ren et coll. [RPE⁺05] ont par exemple testés diverses métriques sur les trajectoires angulaires et leurs dérivées premières. Ils étudient ainsi les performances d'une mixture de Gaussiennes (MoG), d'un modèle de Markov caché (HMM), de systèmes linéaires dynamiques (SLDS) et d'un réseau Bayésien naïf (NB).

Reitsma et Pollard [RP03] ont évalué une métrique perceptuelle sur plusieurs critères. Ils montrent ainsi qu'un observateur remarque plus facilement des différences entre deux mouvements sur les vitesses horizontales plutôt que sur les verticales et que les différences en accélération sont plus facilement décelables qu'en décélération. Ils définissent ainsi une sensibilité aux erreurs dans des mouvements de sauts.

Dans notre cadre de travail, nous ne pouvons pas utiliser de méthodes ni par apprentissage ni par perception car nous cherchons à comparer automatiquement deux ensembles de valeurs isolés. Les méthodes issues de la statistique sont les mieux adaptées à nos objectifs, nous en présentons quelques unes parmi les plus utilisées.

D.1 Méthodes d'évaluation métriques

Nous définissons ici les méthodes métriques comme des méthodes manipulant les valeurs sans normalisation. Prenons l'exemple de deux ensembles d'éléments de dimension $D = 3$ et de tailles N notés $E1 = \{(x_1, y_1, z_1)_1, \dots, (x_1, y_1, z_1)_N\}$ et $E2 = \{(x_2, y_2, z_2)_1, \dots, (x_2, y_2, z_2)_N\}$. Ceci est typiquement le cas pour des vecteurs représentant des positions, rotations, forces, etc.

D.1.1 Erreur RMS d'ordre p

Pour mesurer la distance entre deux ensembles, on peut superposer les deux ensembles et estimer la distance entre chacun des éléments. Il s'agit de l'approche la plus naturelle, elle consiste à assimiler une séquence de données à un vecteur à autant de composantes qu'il y a de données. Puis on définit la distance de norme p entre les deux éléments e_1 et e_2 par la formule :

$$RMS_p = \frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^N (e_1 - e_2)^p \right)^{\frac{1}{p}} \quad (\text{D.1})$$

Lorsque les éléments e_1 et e_2 sont de dimension D supérieure à 1 comme dans notre exemple, deux solutions sont possibles :

- Calculer autant d'erreurs que de dimensions. e_1 et e_2 correspondant successivement aux composantes de l'élément, une erreur est obtenue pour chaque dimension et éventuellement sommée et/ou moyennée.
- Calculer une seule erreur représentant la distance entre les vecteurs modélisant les éléments. La différence entre e_1 et e_2 est la différence entre les vecteurs (x_1, y_1, z_1) et (x_2, y_2, z_2) , par exemple calculée par soustraction membre à membre.

Cette métrique est très utilisée dans le domaine de la biomécanique (ordre 1 et 2) car elle est adaptée à des comparaisons de trajectoires lorsque celles ci sont proches.

D.1.2 La moyenne des distances Euclidiennes

Cette métrique est utilisée plus particulièrement lorsque les éléments sont de dimension D supérieure à 1.

$$Eucl = \frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^N \sqrt{\sum_{j=1}^D (e_1 - e_2)^2} \right) \quad (\text{D.2})$$

Cette formulation a l'avantage de représenter une "vraie" distance interprétable en comparaison aux valeurs d'entrées. Nous pouvons remarquer que si les éléments sont de dimension 1, cette métrique correspond à une erreur RMS d'ordre 2.

D.1.3 Erreur type de prévision

Cette métrique renvoie l'erreur type de la valeur de e_2 prévue pour chaque e_1 de la régression. L'erreur type est une mesure du degré d'erreur dans la prévision de e_2 à partir d'une valeur individuelle e_1 .

$$Err_{prev} = \sqrt{\frac{1}{N(N-2)} \left[N \sum e_2^2 - (\sum e_2)^2 - \frac{[N \sum e_1 e_2 - (\sum e_1 \times \sum e_2)]^2}{N \sum e_1^2 - (\sum e_1)^2} \right]} \quad (D.3)$$

Cette formulation peut constituer une métrique de distance intéressante lorsque l'évolution des écarts aux valeurs moyennes est pertinente.

D.1.4 Distance de Mahalanobis

En statistique, la distance de Mahalanobis est une mesure de distance introduite par P. C. Mahalanobis en 1936. Elle permet de déterminer la similarité entre deux ensembles de valeurs. Elle diffère de la distance euclidienne par le fait qu'elle prend en compte la corrélation de l'ensemble de valeurs. Ainsi, à la différence de la distance euclidienne où toutes les composantes des vecteurs sont traitées de la même façon, la distance de Mahalanobis accorde un poids moins important aux composantes les plus bruitées (en supposant que chaque composante est une variable aléatoire de type gaussien). Pratiquement, la distance de Mahalanobis deux ensembles de valeurs est définie comme suit :

$$M = \sqrt{([e_1 e_2] - [\bar{e}_1 \bar{e}_2])^T \times Cov^{-1} \times ([e_1 e_2] - [\bar{e}_1 \bar{e}_2])} \quad (D.4)$$

Si la matrice de covariance Cov est la matrice identité, cette distance est alors la même que la distance euclidienne.

De récentes approches en animation [UFGT04] se sont intéressées à cette distance, en particulier pour déterminer des distances entre mouvements représentés en composantes principales (ACP). Ces distances sont ensuite utilisées pour pondérer une interpolation sur les vecteurs d'angles du mouvement.

D.2 Méthodes d'évaluation de la ressemblance

Les méthodes du type métrique ont un inconvénient majeur, elles ne considèrent pas la tendance globale des valeurs des ensembles. Dans certains cas, les méthodes métriques peuvent même aller à l'encontre de la notion de ressemblance (voir Figure D.1). C'est typiquement le cas lorsque l'on compare des torseurs de réaction entre membres. Les torseurs de réaction d'une cuisse sur une jambe d'une personne ressemblent plus aux mêmes torseurs de réaction sur une autre personne que ceux de la jambe sur le pied, or les distances obtenues avec les méthodes présentées nous montrent souvent le contraire. Il faut alors introduire un autre concept, celui de ressemblance ou de corrélation.

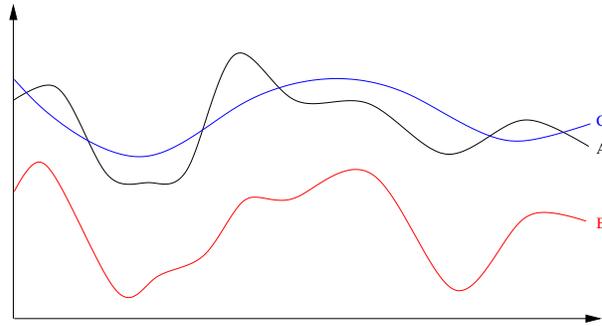


FIG. D.1 – Cas problématique des méthodes métriques d'évaluation des distances. La distance métrique entre A et B est plus petite que celle entre A et C . Dans ce cas, il faut évaluer la ressemblance et non la distance.

D.2.1 Dérivée première

L'idée la plus naturelle pour évaluer la ressemblance, c'est-à-dire la "forme" de deux ensembles de valeurs, est de comparer leurs évolutions. La première méthode possible consiste donc à calculer la distance métrique entre les dérivées premières par rapport aux temps e_1 et e_2 des deux ensembles de valeurs. Une métrique simple du type RMS d'ordre 1 est alors suffisante pour comparer ces nouvelles données.

$$Deriv = \frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^N |\dot{e}_1 - \dot{e}_2| \right) \quad (D.5)$$

Cette méthode compare strictement les évolutions ("vitesses") des valeurs sans prendre en compte le décalage (valeur initiale de l'intégration) entre celles-ci. Suivant le cadre d'application, soit cette méthode est tout à fait adaptée, soit la prise en compte du décalage initial est nécessaire à la notion de ressemblance.

D.2.2 Coefficient de corrélation

Une faiblesse de la covariance utilisée dans les méthodes métriques est qu'elle n'est pas invariante dans un changement d'unités utilisées pour exprimer les valeurs des deux variables e_1 et e_2 alors que la force du lien entre ces deux variables ne dépend évidemment pas des unités utilisées pour les exprimer. Supposons que l'unité utilisée pour mesurer e_1 soit divisée par 2 (et donc que les valeurs de e_1 soient multipliées par 2). Alors la covariance $Cov(e_1, e_2)$ est également multipliée par 2. Mais l'écart type (racine carrée de la variance Var) de e_1 est également multiplié par 2, et donc le rapport $\frac{Cov(e_1, e_2)}{\sqrt{Var(e_1)}}$ reste inchangé. Le même argument s'applique à e_2 , et plus généralement, à tout changement d'unités pour la mesure de e_1 et de e_2 . Donc, en toute généralité, le nombre :

$$cc = \frac{Cov(e_1, e_2)}{\sqrt{Var(e_1) \cdot Var(e_2)}} \quad (D.6)$$

ne dépend pas des unités dans lesquelles e_1 et e_2 sont exprimées. Ce nombre s'appelle le coefficient de corrélation des variables (e_1, e_2) . Il peut être perçu comme la version standardisée de la covariance. La valeur du coefficient de corrélation est toujours comprise entre -1 et $+1$.

- Lorsque $cc = +1$ ou $cc = -1$, cela implique un lien fonctionnel linéaire entre e_1 et e_2 . Il existe alors 3 nombres a , b , et c tels que : $a.e_1 + b.e_2 + c = 0$.
- Que peut-on dire d'un coefficient de corrélation cc proche de 0 ? On ne peut affirmer que le lien entre e_1 et e_2 est faible que si ce lien est linéaire. Mais il est possible qu'un lien fort, mais non linéaire entre e_1 et e_2 conduise à une valeur faible du coefficient de corrélation. Donc en l'absence de certitude sur la linéarité du lien entre e_1 et e_2 , il n'est pas possible de tirer de conclusion d'une faible valeur du coefficient de corrélation. On dit alors que le coefficient de corrélation ne représente que la partie "linéaire" du lien entre e_1 et e_2 .

D.2.3 Matrice de corrélation d'ACP

L'Analyse en Composantes Principales (ACP ou PCA en anglais) est une méthode statistique (initialement de statistique descriptive) qui a pour but de comprendre comment les effets de phénomènes a priori isolés se combinent. Lorsque l'on ne considère que deux effets, il est usuel de caractériser leurs effets conjoints via le coefficient de corrélation (son seul défaut est de ne prendre en compte que des effets conjoints linéaires). Le résultat d'une ACP est de déterminer les axes qui expliquent le mieux la dispersion des données. La question qui a donné naissance à l'ACP est : "comment avoir une intuition rapide des effets conjoints?". En dimension plus grande que deux, une ACP va toujours déterminer les axes (si on est en dimension 256, il y aura 256 axes à déterminer), qui expliquent le mieux la dispersion du nuage de valeurs disponibles. La méthode a pour objectif de remplacer les variables initiales (numériques) par de nouvelles variables (également numériques) qui ont les deux propriétés suivantes :

- Elles peuvent être classées par ordre d'importance décroissante (on sait donner un sens précis à ce terme). Ainsi, les premières Composantes Principales (donc les plus importantes) suffisent pour rendre compte des données avec une perte minimale d'information. En d'autres termes, les données initiales peuvent être remplacées par de nouvelles données dans lesquelles figurent les mêmes individus, mais décrits par des variables en plus petit nombre.
- Ces nouvelles variables sont deux à deux décorréelées.

L'ACP peut donc être vue comme une technique de réduction de dimensionnalité, elle procède notamment par la diagonalisation de la matrice de corrélation des variables originales (le plus souvent standardisées). Cette méthode de décomposition peut être utilisée pour modéliser le mouvement [AM00, GBT04b]. Cette modélisation pouvant alors par la suite être utilisée efficacement lors de recherche dans des bases de données [FF05].

Dans notre cas d'éléments à 3 dimensions, nous pouvons représenter la ressemblance entre deux ensembles par 4 matrices de corrélation :

1. 2 matrices colonnes globales

$$A = \begin{bmatrix} | \\ x_1 \\ | \\ y_1 \\ | \\ z_1 \\ | \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} | \\ x_2 \\ | \\ y_2 \\ | \\ z_2 \\ | \end{bmatrix}$$

2. 2 x 3 matrices colonnes

$$A = \begin{bmatrix} | \\ x_1 \\ | \end{bmatrix} \begin{bmatrix} | \\ y_1 \\ | \end{bmatrix} \begin{bmatrix} | \\ z_1 \\ | \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} | \\ x_2 \\ | \end{bmatrix} \begin{bmatrix} | \\ y_2 \\ | \end{bmatrix} \begin{bmatrix} | \\ z_2 \\ | \end{bmatrix}$$

3. 2 matrices lignes globales 4. 2 x 3 matrices lignes

$$\begin{aligned} A &= [-x_1 - y_1 - z_1 -] & A &= [-x_1 -] [-y_1 -] [-z_1 -] \\ B &= [-x_2 - y_2 - z_2 -] & B &= [-x_2 -] [-y_2 -] [-z_2 -] \end{aligned}$$

Dans l'algorithme standard d'une ACP, la matrice de corrélation est carrée (de taille D), symétrique, et réelle. Ici nous construisons des matrices non carrées que nous normalisons. En calculant alors la somme des produits membre à membre des matrices nous obtenons l'équivalent de l'inverse du cosinus des angles entre les vecteurs représentés par les matrices (de dimension T), que nous pouvons appeler coefficient de ressemblance cr :

$$cr = \sum_{i=1}^T \left(\frac{A_i}{(\sum A_i \times A_i)^{\frac{1}{2}}} \times \frac{B_i}{(\sum B_i \times B_i)^{\frac{1}{2}}} \right) \quad (D.7)$$

Nous avons choisi de normaliser les matrices et non de les standardiser afin de pouvoir comparer les résultats des calculs de ressemblances quelque soient les ensembles de valeurs étudiés. Ce coefficient de ressemblance, tout comme celui de corrélation, est compris entre -1 et $+1$, par contre son interprétation est différente. Un cr proche de $+1$ indique une très bonne ressemblance alors qu'une valeur proche de -1 indique une mauvaise ressemblance.

La différence entre les dimensions des vecteurs donne un sens différent aux coefficients :

1. 1 coefficient indiquant la ressemblance globale des vecteurs 3D.
2. 3 coefficients indiquant la ressemblance des composantes des vecteurs 3D.
3. N coefficients indiquant la ressemblance des vecteurs 3D à chaque pas de temps.
4. $3 \times N$ coefficients indiquant la ressemblance de chaque composante à chaque pas de temps.

Glossaire et notations

articulation distale	articulation à l'extrémité du segment, par exemple le poignet pour l'avant-bras
articulation proximale	articulation parent du segment, par exemple le coude pour l'avant-bras
ATIP	Projet d'Action Thématique et Incitative sur Programme
CdM	centre de masse, en anglais : <i>center of mass (COM)</i>
cycle	un cycle de locomotion est défini du décollage d'un pied à un nouveau décollage de ce même pied
ddl	degré de liberté, en anglais : <i>degree of freedom (DOF)</i>
effecteur	extrémité d'une chaîne cinématique
FBD	Free Body Diagram, principe d'isolement d'un corps d'une chaîne cinématique
FRS	force de réaction au sol
g	constante de gravitation, valant environ 9.81
humanoïde	humain virtuel
locomotion	tout mouvement ne faisant pas intervenir de forces externes autres que la réaction au sol, les forces aérodynamiques et la gravité, par exemple : marche, course et saut.
modèle biomécanique	modélisation incluant les informations de masses et d'inerties
os sec	os sans aucun résidu de tissus, muscles ou tendons
PFD	Principe Fondamental de la Dynamique, correspondant à la seconde loi de Newton
posture de référence	posture de repos de l'humanoïde
poulaine	trajectoire cartésienne de la cheville dans le repère racine de l'humanoïde
<i>retargeting</i>	méthode d'adaptation morphologique
RMS	<i>Root Mean Square</i> , métrique d'erreur par différence d'ordre n
sémantique d'un membre	nature du membre, par exemple une main, un pied ou un tronc
système articulaire	ensemble d'articulations pivot colocalisées
torseur	objet mathématique constitué de deux champs exprimant les forces résultantes et les moments

Bibliographie

- [AF02] O. Arikian et D.A. Forsyth : Interactive motion generation from examples. *ACM Transactions on Graphics*, 21(3):483–490, 2002.
- [AFO02] O. Arikian, D. Forsyth et J. O'Brien : Motion synthesis from annotations. *ACM Transactions on Graphics*, 33(3):402–408, 2002.
- [AFO05] O. Arikian, D.A. Forsyth et J.F. O'Brien : Pushing people around. *Dans ACM Siggraph / Eurographics Symposium on Computer Animation*, pages 59–67, 2005.
- [Ale84] R.M. Alexander : Walking and running. *Dans American Scientist volume 72*, pages 348–354, 1984.
- [AM00] M. Alexa et W. Müller : Representing animations by principal components. *Dans Proceedings of Eurographics'00*, 2000.
- [ANC89] J. Apkarian, S. Naumann et B. Cairns : A three-dimensional kinematic and dynamic model of lower limb. *Journal of Biomechanics*, 22:143–155, 1989.
- [Arn89] B. Arnaldi : *Conception du noyau d'un système d'animation de scènes tridimensionnelles intégrant les lois de la mécanique*. Thèse de doctorat, Université de Rennes 1, 1989.
- [ASH05] Rapport action spécifique CNRS : "Humain virtuel : vers un humain synthétique temps-réel aussi vrai que nature", 2005.
- [AW00] G. Ashraf et K.C. Wong : Generating consistent motion transition via decoupled framespace interpolation. *Computer Graphics Forum*, 19(3), 2000.
- [AW01] G. Ashraf et K.C. Wong : Constrained framespace interpolation. *Dans Computer Animation 2001 : Proceedings of the 14th Conference on Computer Animation*, pages 61–72, Novembre 2001.
- [AW03] G. Ashraf et K.C. Wong : Semantic representation and correspondence for state-based motion transition. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 9(4):481–499, 2003.
- [BB98] R. Bindiganavale et N.I. Badler : Motion abstraction and mapping with spatial constraints. *Lecture Notes in Computer Science*, 1537:70–82, 1998.
- [BB00] P. Baerlocher et R. Boulic : Kinematic control of the mass properties of redundant articulated bodies. *Dans ICRA*, pages 2557–2562, 2000.

- [BB01] R. Boulic et P. Baerlocher : Cinématique inverse pour personnage 3D : solutions analytiques et variationnelles. *Revue de CFAO*, 16(1):83–99, 2001.
- [BBET97] R. Boulic, P. Becheiraz, L. Emering et D. Thalmann : Integration of motion control techniques for virtual human and avatar real-time animation. *Dans VRST'97 : Proceedings of the ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*, pages 111–118, 1997.
- [BC89] A. Bruderlin et T.W. Calvert : Goal-directed, dynamic animation of human walking. *Proceedings of SIGGRAPH'89, Computer Graphics*, 23(3):233–242, Juillet 1989.
- [BC93] A. Bruderlin et T.W. Calvert : Interactive animation of personalized human locomotion. *Dans Graphics Interface*, pages 17–23, Mai 1993.
- [BC96] A. Bruderlin et T.W. Calvert : Knowledge-driven, interactive animation of human running. *Dans GI'96 : Proceedings of the Conference on Graphics Interface*, pages 213–221, 1996.
- [BH00] M. Brand et A. Hertzmann : Style machines. *Dans Proceedings of ACM SIGGRAPH'00, Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series*, pages 183–192, 2000.
- [BMD03] H. Beaupied, F. Multon et P. Delamarche : Does training have consequences for the walk-run transition speed? *Human Movement Science*, 22:1–12, 2003.
- [BMP04] C. Bregler, J. Malik et K. Pullen : Twist based acquisition and tracking of animal and human kinematics. *International Journal of Computer Vision*, 56(3):179–194, 2004.
- [BMT94] R. Boulic, R. Mas et D. Thalmann : Inverse kinetics for center of mass position control and posture optimization. *Race workshop on "Combined real and synthetic image processing for broadcast and video production (Monalisa Project)"*, Septembre 1994.
- [BNM⁺05] G. Berillon, G. Nicolas, F. Multon, F. Marchal, G. Dumont, Y. Deloison et D. Gommery : Testing locomotor hypothesis in early hominids : 3d modeling and simulation of bipedalisms using anatomical data. *American Journal of Physical Anthropology*, 106:40–73, 2005.
- [Bow00] R. Bowden : Learning statistical model of human motion. *Dans IEEE Workshop on Human Modelling, Analysis and Synthesis*, 2000.
- [BSS83] R.G. Burdett, G.S. Skrinar et S.R. Simon : Comparison of mechanical work and metabolic energy consumption during normal gait. *Journal of Orthopaedic Research*, 1(1):63–72, 1983.
- [BST97] R. Boulic, M-C. Silaghi et D. Thalmann : Complex character positioning based on a compatible flow model of multiple supports. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 3(3):245–261, 1997.

- [BST00] R. Boulic, M-C. Silaghi et D. Thalmann : Visualization of local movements for optical marker positioning. *Dans AMDO'00 : Proceedings of the First International Workshop on Articulated Motion and Deformable Objects*, pages 133–144, 2000.
- [BT92] R. Boulic et D. Thalmann : Combined direct and inverse kinematic control for articulated figure motion editing. *Computer Graphics Forum*, 11(4): 189–202, 1992.
- [BW71] N. Burtnyk et M. Wein : Computer generated key frame animation. *Journal of the Society of Motion Picture and Television Engineers*, 8(3):149–153, 1971.
- [BW95] A. Bruderlin et L. Williams : Motion signal processing. *Dans Proceedings of SIGGRAPH'95, Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series*, pages 97–104, Août 1995.
- [CHP89] J.E. Chadwick, D.R. Haumann et R.E. Parent : Layered construction for deformable animated characters. *Dans SIGGRAPH'89 : Proceedings of the 16th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, pages 243–252, 1989.
- [CLS00] K-J. Choi, J. Lee et S.Y. Shin : Online motion retargetting. *Journal of Visualisation and Computer Animation*, 11(5):223–235, 2000.
- [CLW+98] R.H. Crompton, Y. Li, W.J. Wang, M.M. Günther et R. Savage : The mechanical effectiveness of erect 'bent-hip', 'bent-knee' bipedal walking in Australopithecus Afarensis. *Journal of Human Evolution* 35, pages 55–74, 1998.
- [Coo67] S.A. Coons : Surfaces for computer aided design of space forms. Rapport technique, MIT Project TR-41, Cambridge, MA, 1967.
- [Cor96] P.I. Corke : A robotics toolbox for MATLAB. *IEEE Robotics and Automation Magazine*, 3(1):24–32, 1996.
- [CPK99] K-J. Choi, S-H. Park et H-S. Ko : Processing motion capture data to achieve positional accuracy. *Graphics Models Image Processing*, 61(5):260–273, 1999.
- [CW99] K. Chu et M. Wong : Fast time-series searching with scaling and shifting. *Dans Proceedings of ACM Principles of Database Systems*, pages 237–248, 1999.
- [CWLG03] R.H. Crompton, W.J. Wang, Y. Li et M.M. Günther : Energy transformation during erect and 'bent-hip', 'bent-knee' walking by humans with implications for the evolution of bipedalism. *Journal of Human Evolution* 44, pages 563–579, 2003.
- [Del92] Y. Deloison : Empreintes de pas à Laetoli (Tanzani). leur apport à une meilleure connaissance de la locomotion des hominidés fossiles. *C.R. Acad. Sci. Paris, t.315, Série II*, pages 103–109, 1992.

- [DeL96] P. DeLeva : Adjustments to zatsiorsky-seluyanov's segment inertia parameters. *Journal of Biomechanics*, 29(9):1223–1230, 1996.
- [Dem55] W.T. Dempster : Space requirements for the seated operator. Rapport technique, Wright-Patterson Air Force Base, Ohio, 1955.
- [Dum90] G. Dumont : *Animation de scènes tridimensionnelles : la mécanique des solides comme modèle de synthèse de mouvement*. Thèse de doctorat, Université de Rennes 1, 1990.
- [Dum91] G. Dumont : Rapport final de convention inrets/inria. Rapport technique, INRIA-Rennes/IRISA, 1991.
- [Eno94] R.M. Enoka : *Neuromechanical basis of kinesiology (2nd édition)*. Human Kinetics, 1994.
- [FCKV06] A. Forner-Cordero, H. Koopman et F. Van der Helm : Inverse dynamics calculations during gait with restricted ground reaction force information from pressure insoles. *Gait and Posture*, 23:189–199, 2006.
- [FDCM97] F. Faure, G. Debunne, M-P. Cani et F. Multon : Dynamic analysis of human walking. *Dans Eurographics Workshop on Computer Animation and Simulation (EGCAS)*, 1997.
- [FF05] K. Forbes et E. Fiume : An efficient search algorithm for motion data using weighted PCA. *Dans SCA'05 : Proceedings of the 2005 ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation*, 2005.
- [FMS01] D. Furukawa, K. Mori et Y. Suenaga : Human spine posture estimation from video images based on connected vertebra spheres model. *Dans Proceedings of the 14th Conference on Computer Animation'01*, pages 174–181, 2001.
- [FP03] A. Fang et N. Pollard : Efficient synthesis of physically valid human motion. *Dans Proceedings of ACM SIGGRAPH*, volume 22(3), pages 417–426, 2003.
- [FVT01] P. Faloutsos, M. Van de Panne et D. Terzopoulos : Composable controllers for physics-based character animation. *Dans SIGGRAPH'01 : Proceedings of the 28th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, pages 251–260, Août 2001.
- [GBT04a] P. Glardon, R. Boulic et D. Thalmann : A coherent locomotion engine extrapolation beyond experimental data. *Dans Proceedings of CASA'04*, pages 73–84, 2004.
- [GBT04b] P. Glardon, R. Boulic et D. Thalmann : PCA-based walking engine using motion capture data. *Dans Computer Graphics International*, pages 292–298, 2004.
- [Gib02] S. Gibet : *Modèles d'analyse-synthèse du mouvement*. Habilitation à diriger les recherches, Université de Bretagne Sud, Vannes, France, Juillet 2002.

- [Gil97] D. Gillard : *Vers l'animation dynamique d'un corps humain virtuel : utilisation de données biomédicales 3D*. Thèse de doctorat, Université de Reims Champagne-Ardenne, 1997.
- [Gir87] M. Girard : Interactive design of 3D computer-animated legged animal motion. *Dans IEEE Computer Graphics and Application*, pages 39–51, Juin 1987.
- [GL98] M. Gleicher et P. Litwinowicz : Constrained-based motion adaptation. *The Journal of Visualization and Computer Animation*, 9(2):65–94, 1998.
- [Gle97] M. Gleicher : Motion editing with spacetime constraints. *Dans Symposium on Interactive 3D Graphics'97*, pages 139–148, Avril 1997.
- [Gle98] M. Gleicher : Retargetting motion to new characters. *Dans Proceedings of SIGGRAPH'98, Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series*, pages 33–42, Juillet 1998.
- [Gle01a] M. Gleicher : Comparing constrained-based motion editing methods. *Graphical Models*, 63(2):107–134, 2001.
- [Gle01b] M. Gleicher : Motion path editing. *Dans ACM Symposium on Interactive 3D Graphics'01*, pages 195–202, Mars 2001.
- [GM85] M. Girard et A.A. Maciejewski : Computational modeling for the computer animation of legged figures. *Dans SIGGRAPH'85 : Proceedings of the 12th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, pages 263–270, 1985.
- [GMHP04] K. Grochow, S.L. Martin, A. Hertzmann et Z. Popovic : Style-based inverse kinematics. *ACM Transactions on Graphics*, 23(3):522–531, 2004.
- [Gou97] R. Gourdeau : Object oriented programming for robotic manipulators simulation. *IEEE Robotics and Automation Magazine*, 4(3), 1997.
- [GR96] S. Guo et J. Robergé : A high-level control mechanism for human locomotion based on parametric frame space interpolation. *Dans Proceedings of the Eurographics Workshop on Computer Animation and Simulation'96*, pages 95–107, 1996.
- [Gra18] H. Gray : *Anatomy of the human body*. Lea and Febiger, 1918.
- [GT95] R. Grzeszczuk et D. Terzopoulos : Automated learning of muscle-actuated locomotion through control abstraction. *Dans Proceedings of SIGGRAPH'95*, pages 63–70, 1995.
- [GZL00] R. Grasso, M. Zago et F. Lacquaniti : Interactions between posture and locomotion : Motor patterns in humans walking with bent posture versus erect posture. *Journal of Neurophysiology*, 83:288–300, 2000.
- [HA06] H-Anim : Information technology - Computer Graphics and Image Processing - Humanoid animation. *ISO/IEC FCD 19774 :2006*, <http://www.h-anim.org>, 2006.

- [HD55] R.S. Hartenberg et J. Denavit : A kinematic notation for lower-pair mechanisms based on matrices. *Journal of Applied Mechanics*, pages 215–221, 1955.
- [Hin90] R.N. Hinrichs : Adjustements to the segment center of mass proportions of Clauser et al. *Journal of Biomechanics*, 23(9):949–951, 1990.
- [HM93] A. Hreljac et P.E. Martin : The relationship between smoothness and economy during walking. *Biological Cybernetics*, 69(3):213–218, 1993.
- [Hod96] J.K. Hodgins : Three-dimensional human running. *Dans IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1996.
- [Hod98] J.K. Hodgins : Animating human motion. *Scientific American*, 278(3):64–69, Mars 1998.
- [HP97] J.K. Hodgins et N.S. Pollard : Adapting simulated behaviors for new characters. *Dans Proceedings of ACM SIGGRAPH*, 1997.
- [HWBO95] J.K. Hodgins, W.L. Wooten, D.C. Brogan et J.F. O'Brien : Animating human athletics. *Dans Proceedings of SIGGRAPH'95*, pages 71–78, 1995.
- [IAF06] L. Ikemoto, O. Arikan et D. Forsyth : Knowing when to put your foot down. *Dans Symposium on Interactive 3D Graphics and Games (I3D)*, 2006.
- [Joh73] G. Johansson : Visual perception of biological motion and a model for its analysis. *Perception and Psychophysics*, 14(2):201–211, 1973.
- [KB82] J.U. Korein et N.I. Badler : Techniques for generating the goal-directed animation of articulated structures. *IEEE Computer Graphics and Application*, 2(9):71–81, 1982.
- [KE99] P.A. Kramer et G.G. Eck : Locomotion energetics and leg length in hominid bipedality. *Journal of Human Evolution*, pages 651–666, 1999.
- [KG03] L. Kovar et M. Gleicher : Flexible automatic motion blending with registration curves. *Dans SCA'03 : Proceedings of the 2003 ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation*, pages 214–224, 2003.
- [KG04] L. Kovar et M. Gleicher : Automated extraction and parametrization of motions in large data sets. *ACM Transactions on Graphics*, 23(3):559–568, 2004.
- [KGP02] L. Kovar, M. Gleicher et F. Pighin : Motion graphs. *Dans Proceedings of the 29th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, pages 473–482, 2002.
- [KGS02] L. Kovar, M. Gleicher et J. Schreiner : Footstake cleanup for motion capture. *Dans ACM Siggraph Symposium on Computer Animation*, 2002.
- [KHL05] T. Komura, S.L. Ho et W.H. Lau : Animating reactive motion using momentum-based inverse kinematics and captured motion. *Dans Computer Animation and Virtual Worlds Journal (Intl. Conf. on Computer Animation and Social Agents, CASA 2005)*, 2005.

- [KK86] W. Khalil et J. Kleinfinger : A new geometric notation for open and closed loop robots. *Dans ICRA '86*, pages 75–79, 1986.
- [KMA05] R. Kulpa, F. Multon et B. Arnaldi : Morphology-independent representation of motions for interactive human-like animation. *Computer Graphics Forum / EG2005 Proceedings*, 24(3):343–352, 2005.
- [KOF05] A.G. Kirk, J.F. O'Brien et D.A. Forsyth : Skeletal parameter estimation from optical motion capture data. *Computer Vision and Pattern Recognition 2005*, 2:782–788, 2005.
- [Kra99] PA. Kramer : Modelling the locomotor energetics of extinct hominids. *The Journal of Experimental Biology*, pages 2807–2818, 1999.
- [KS01] T. Komura et Y. Shinagawa : Attaching physiological effects to motion-captured data. *Dans Proceedings of GRIN'01*, pages 27–36, 2001.
- [KS05] T. Kwon et S.Y. Shin : Motion modeling for on-line locomotion synthesis. *Dans SCA '05 : Proceedings of the 2005 ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation*, pages 29–39, 2005.
- [KSK00] T. Komura, Y. Shinagawa et T.L. Kunii : Creating and retargetting motion by the musculoskeletal human body model. *The Visual Computer*, 16(5): 254–270, 2000.
- [Kul05] R. Kulpa : *Adaptation interactive et performante de mouvement d'humanoïdes synthétiques : aspects cinématique, cinétique et dynamique*. Thèse de doctorat, INSA de Rennes, 2005.
- [LB04] B. Le Callennec et R. Boulic : Interactive motion deformation with prioritized constraints. *Dans Proceedings of ACM/Eurographics SCA*, pages 163–171, 2004.
- [LBB91] JH. Langdon, J. Bruckner et HH. Baker : Pedal mechanics and bipedalism in early hominids. *Cahiers de Paléanthropologie*, pages 160–167, 1991.
- [LCF00] J.P. Lewis, M. Cordner et N. Fong : Pose space deformation : A unified approach to shape interpolation and skeleton-driven deformation. *Dans SIGGRAPH'00 : Proceedings of the Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, pages 165–172, 2000.
- [LCR⁺02] J. Lee, J. Chai, P.S. Reitsma, J.K. Hodgins et N.S. Pollard : Interactive control of avatars animated with human motion data. *ACM Transactions on Graphics*, 21(3):491–500, 2002.
- [Lec94] C. Lecerf : *Contrôle de mouvement de systèmes mécaniques en animation*. Thèse de doctorat, Université de Rennes 1, 1994.
- [LGY⁺06] Q.L. Li, W.D. Geng, T. Yu, X.J. Shen, N. Lau et G. Yu : MotionMaster : Authoring and choreographing kung-fu motions by sketch drawings. *Dans SCA '06 : Proceedings of the 2006 ACM SIGGRAPH/Eurographics symposium on Computer Animation*, Septembre 2006.

- [LHP05] C.K. Liu, A. Hertzmann et Z. Popović : Learning physics-based motion style with nonlinear inverse optimization. *ACM Transactions on Graphics*, 24(3):1071–1081, 2005.
- [Lie77] A. Liegeois : Automatic supervisory control of the configuration and behavior of multibody mechanism. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, SMC-7(12):35–42, Décembre 1977.
- [LJT⁺00] J. Laczko, S. Jaric, J. Tihanyi, V.M. Zatsiorsky et M.L. Latash : Components of the end-effector jerk during voluntary arm movements. *Journal of Applied Biomechanics*, 16(1):14–25, 2000.
- [LL04] J. Lee et K.H. Lee : Precomputing avatar behavior from human motion data. Dans *SCA'04 : Proceedings of the 2004 ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation*, pages 79–84, 2004.
- [LP02] C.K. Liu et Z. Popović : Synthesis of complex dynamic character motion from simple animations. Dans *SIGGRAPH'02 : Proceedings of the 29th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, 2002.
- [LS99] J. Lee et S.Y. Shin : A hierarchical approach to interactive motion editing for human-like figures. Dans *SIGGRAPH'99 : Proceedings of the 26th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, pages 39–48, 1999.
- [LV96] A. Lamouret et M. Van de Panne : Motion synthesis by example. Dans *Eurographics Int. Workshop on Animation and Simulation*, 1996.
- [LVF00] J. Laszlo, M. Van De Panne et E.L. Fiume : Interactive control for physically-based animation. Dans *Proceedings of SIGGRAPH'00*, pages 201–208, 2000.
- [Mar94] M. Marey : *Mécanique animale, volume 119*. New-York : Appleton and Co., 1894.
- [Mas96] R. Mas : *Balance control of multiple supported articulated systems for computer animation*. Thèse de doctorat, Université des Iles Baléares, 1996.
- [MB91] G. Monheit et N.I. Badler : A kinematic model of the human spine and torso. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 11(2):29–38, 1991.
- [MB01] F. Marchal et G. Berillon : Modelling the architecture of the pelvic girdle and lower line functional complex : a three dimensional perspective. Dans *14ème congrès de l'UISPP, Liège*, September 2001.
- [MBBT00] J-S. Monzani, P. Baerlocher, R. Boulic et D. Thalmann : Using an intermediate skeleton and inverse kinematics for motion retargetting. *Computer Graphics Forum*, 19(3), Août 2000.
- [MCY69] J.T. McConville, C.E. Clauser et J.W. Young : Weight, volume and center of mass of segments of the human body. Rapport technique, AMRL 69-70, Wright-Patterson Air Force Base, Ohio, 1969.

- [MFCGD99] F. Multon, L. France, MP. Cani-Gascuel et G. Debunne : Computer animation of human walking : a survey. *Journal of Visualisation and Computer Animation*, 1999.
- [MGJ01] P.F. Marteau, S. Gibet et F. Juillard : Non parametric learning of sensori-motor maps. Application to the control of multi joint systems. *Dans WSES/IEEE conf. on Neural, Fuzzy and Evolutionary Computation*, Juillet 2001.
- [MKMA04] S. Ménardais, R. Kulpa, F. Multon et B. Arnaldi : Synchronization for dynamic blending of motions. *Dans Proceedings of ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation*, pages 325–336, 2004.
- [MMKA04] S. Ménardais, F. Multon, R. Kulpa et B. Arnaldi : Motion blending for real-time animation while accounting for the environment. *Dans CGI'04 : Proceedings of the Computer Graphics International*, pages 156–159, 2004.
- [MNA⁺99] F. Multon, J.L. Nougaret, B. Arnaldi, G. Hégron et L. Millet : A software system to carry-out virtual experiments on human motion. *Dans Proceedings IEEE Computer Animation*, pages 16–23, Mai 1999.
- [MPD02] A. Maciel, L. Porcher Nedel et C.M. Dal Sasso Freitas : Anatomy-based joint models for virtual human skeletons. *Dans CA'02 : Proceedings of the Computer Animation*, page 220, 2002.
- [MRY⁺75] J.T. McConville, H.M. Reynolds, J.W. Young, R.F. Chandler et C.E. Clauser : Investigation of inertial properties of the human body. Rapport technique, AMRL 74-137, Wright-Patterson Air Force Base, Ohio, 1975.
- [MS05] A. Monin et W. Suleiman : Estimation de la masse des éléments du corps humain par capture de mouvement. Rapport technique, LAAS-CNRS, 2005.
- [MT00] W. Maurel et D. Thalmann : Human upper limb modeling including scapulo-thoracic constraint and joint sinus cones. *Computers and Graphics*, 24(2):203–218, 2000.
- [Mul98] F. Multon : *Contrôle du mouvement des humanoïdes de synthèse*. Thèse de doctorat, Université de Rennes 1, 1998.
- [Mén03] S. Ménardais : *Fusion et adaptation temps réel de mouvements acquis pour l'animation d'humanoïdes synthétiques*. Thèse de doctorat, Université de Rennes 1, 2003.
- [Neb00] J.C. Nebel : Realistic collision avoidance of upper limbs based on neuroscience models. *Computer Graphics Forum*, 19(3), 2000.
- [NMB04] G. Nicolas, F. Multon et G. Berillon : Inverse kinematics for the calculation of plausible bipedal locomotion using anthropological knowledge. *Dans Proceedings of CASA'04*, pages 103–110, Juillet 2004.
- [NTH85] J. Nilsson, A. Thorstensson et J. Halbertsam : Change in leg movements and muscle activity with speed of locomotion and mode of progression in humans. *Dans Acta Physio. Scand.*, pages 457–475, 1985.

- [OBBH00] J. O'Brien, R. Bodenheimer, G. Brostow et J. Hodgins : Automatic joint parameter estimation from magnetic capture data. *Dans Proceedings of Graphics Interface'00*, pages 53–60, 2000.
- [OM01] M. Oshita et A. Makinouchi : A dynamic motion control technique for human-like articulated figures. *Computer Graphics Forum / EG2001 Proceedings*, 20(3):192–202, 2001.
- [OTH02] S. Oore, D. Terzopoulos et G. Hinton : Local physical models for interactive character animation. *Computer Graphics Forum / EG2002 Proceedings*, 21(3), 2002.
- [Pat91] A.E. Patla : *Adaptability of human gait*. Elsevier Science Publishers, 1991. Chapitre Visual Control of Human Locomotion.
- [PB91] C.B. Phillips et N.I. Badler : Interactive behavior for bipedal articulated figures. *Dans Proceedings of SIGGRAPH'91 on Computer Graphics*, pages 359–362, Juillet 1991.
- [PD06] N. Pronost et G. Dumont : Validating retargeted and interpolated locomotions by dynamics-based analysis. *Dans 4th International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques in Australasia and South-East Asia - GRAPHITE 2006*, pages 65–74, Kuala Lumpur, Malaisie, 29 Novembre - 2 Décembre 2006.
- [PDBN06] N. Pronost, G. Dumont, G. Berillon et G. Nicolas : Morphological and stance interpolations in database for simulating bipedalism of virtual humans. *The Visual Computer*, 22(1):4–13, 2006.
- [Pen55] F. Penrose : A generalized inverse for matrices. *Dans Proceedings of the Cambridge Philosophical Society 51*, pages 406–413, 1955.
- [PNDM05] N. Pronost, G. Nicolas, G. Dumont et F. Multon : Combining morphological interpolation and biomechanical inverse kinematics to simulate bipedal locomotion. *Dans IASTED - Visualization, Imaging and Image Processing 2005 Conference, Benidorm - Espagne*, pages 39–45, Septembre 2005.
- [PRE06] PREMOG : The primate evolution and morphology group. *The University of Liverpool*, <http://www.liv.ac.uk/premog/>, 2006.
- [PSKS04] S.I. Park, H.J. Shin, T.H. Kim et S.Y. Shin : On-line motion blending for real-time locomotion generation. *Computer Animation and Virtual World*, 15(3-4):125–138, 2004.
- [PSS02] S.I. Park, H.J. Shin et S.Y. Shin : On-line locomotion generation based on motion blending. *Dans ACM SIGGRAPH'02 Symposium on Computer Animation*, pages 105–112, Juillet 2002.
- [PV83] F. Plas et E. Veil : *La marche humaine, Kinésiologie dynamique, Biomécanique et pathomécanique*. Masson, 1983.
- [PW99] Z. Popović et A. Witkin : Physically based motion transformation. *Dans SIGGRAPH'99*, 1999.

- [RBM02] I. Rodriguez, R. Boulic et D. Meziat : A joint-level model of fatigue for the postural control of virtual humans. *Proceedings of Human and Computer 2002 Tokyo (Japan)*, pages 220–225, 2002.
- [RCB98] C. Rose, M.F. Cohen et B. Bodenheimer : Verbs and adverbs : multidimensional motion interpolation. *IEEE Computer Graphics and Application*, 18(5):32–40, 1998.
- [RG91] H. Rijkema et M. Girard : Computer animation of knowledge-based human grasping. *Dans ACM SIGGRAPH'91*, pages 339–348, 1991.
- [RGBC96] C.F. Rose, B. Guenter, B. Bodenheimer et M.F. Cohen : Efficient generation of motion transitions using spacetime constraints. *Dans Proceedings of ACM SIGGRAPH'96, Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series*, pages 147–154, 1996.
- [RP03] P. Reitsma et N. Pollard : Perceptual metrics for character animation : sensitivity to errors in ballistic motion. *ACM Transactions on Graphics*, 22(3):537–542, 2003.
- [RPE⁺05] L. Ren, A. Patrick, A.A. Efros, J.K. Hodgins et J.M. Rehg : A data-driven approach to quantifying natural human motion. *ACM Transactions on Graphics*, 24(3):1090–1097, 2005.
- [Rém00] Y. Rémion : Animation dynamique : moteur lagrangien généraliste et applications, 2000. Habilitation à Diriger des Recherches, Université de Reims Champagne-Ardenne.
- [Sav02] A. Savenko : *Animating character locomotion using biomechanics-based figure models*. Thèse de doctorat, Moscow State University, Juillet 2002.
- [SB04] P. Sardain et G. Bessonnet : Forces acting on a biped robot. center of pressure-zero moment point. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part A*, 34(5):630–637, Septembre 2004.
- [SC02] A. Savenko et G. Clapworthy : Using motion analysis techniques for motion retargetting. Rapport technique, Departement of Computer & Information Sciences - De Montfort University, 2002.
- [SH05] A. Safonova et J.K. Hodgins : Analyzing the physical correctness of interpolated human motion. *Dans Proceedings of SCA'05*, pages 171–180, Juillet 2005.
- [SJC99] A. Savenko, S. Van Sint Jan et G. Clapworthy : A biomechanics-based model for the animation of human locomotion. Rapport technique, Departement of Computer and Information Sciences - De Montfort University, 1999.
- [SLSG01] H.J. Shin, J. Lee, S.Y. Shin et M. Gleicher : Computer puppetry : an importance-based approach. *ACM Transaction on Graphics*, 20(2):67–94, 2001.
- [SM01] H.C. Sun et D.N. Metaxas : Automating gait generation. *Dans SIGGRAPH'01 : Proceedings of the 28th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, pages 261–270, 2001.

- [SPB⁺98] M-C. Silaghi, R. Plankers, R. Boulic, P. Fua et D. Thalmann : Local and global skeleton fitting techniques for optical motion capture. *Dans CAPTECH'98 : Proceedings of the International Workshop on Modelling and Motion Capture Techniques for Virtual Environments*, pages 26–40, 1998.
- [SSSE00] A. Schöld, R. Szeliski, D.H. Salesin et I. Essa : Video textures. *Dans Proceedings of ACM SIGGRAPH'00, Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series*, pages 489–498, 2000.
- [TA06] D.G. Thelen et F.C. Anderson : Using computed muscle control to generate forward dynamic simulations of human walking from experimental data. *Journal of Biomechanics*, 39:1107–1115, 2006.
- [TAT93] C. Tardieu, A. Aurengo et B. Tardieu : New method of three-dimensional analysis of bipedal locomotion for the study of displacement of the body and body-parts centers of mass in man and non-human primates : evolutionary framework. *American Journal of Physical Anthropology*, 90:455–476, 1993.
- [TB96] D. Tolani et N.I. Badler : Real-time inverse kinematics of the human arm. *Presence, Teleoperators, and Virtual Environments*, 5(4):393–401, 1996.
- [TGB00] D. Tolani, A. Goswami et N.I. Badler : Real-time inverse kinematics techniques for anthropomorphic limbs. *Graphics Models*, 62(5):353–388, 2000.
- [Tor89] V. Torczon : *Multi-directional Search : A Direct Search Algorithm for Parallel Machines*. Thèse de doctorat, Rice University, Houston, Texas, USA, 1989.
- [TPZZ06] B. Tang, Z. Pan, L. Zheng et M. Zhang : Interactive generation of falling motions. *Dans Computer Animation and Virtual Worlds Journal (Intl. Conf. on Computer Animation and Social Agents, CASA 2006)*, pages 271–279, Septembre 2006.
- [TSK00] S. Tak, O-Y. Song et H-S. Ko : Motion balance filtering. *Computer Graphics Forum*, 19(3), 2000.
- [TSK02] S. Tak, O-Y. Song et H-S. Ko : Spacetime sweeping : an interactive dynamic constraint solver. *Dans CA'02 : Proceedings of the Computer Animation*, pages 261–270, 2002.
- [UAT95] M. Unuma, K. Anjyo et R. Takeuchi : Fourier principles for emotion-based human figure animation. *Dans Proceedings of ACM SIGGRAPH'95*, pages 91–96, 1995.
- [UFGT04] R. Urtasun, P. Fua, P. Glardon et D. Thalmann : Mahalanobis motion generation. Rapport technique, CVL/VRL, Swiss Federal Institute of Technology, 2004.
- [Van97] M. Van de Panne : From footprints to animation. *Computer Graphics Forum*, 16(4):211–224, 1997.

- [VDO99] C.L. Vaughan, B.L. Davis et J.C. O'Connor : *Dynamics of Human Gait (2nd édition)*. Kiboho Publisher, 1999.
- [VPPE85] E. Viel, A. Perelle, J. Peyranne et M. Esnault : Analyse tridimensionnelle de la marche et de l'appui du pied au sol. *Med. Chir. Pied*, 2(5):151–160, 1985.
- [Vuk90] M. Vukobratovic : *Biped locomotion*. Springer-Verlag New York, Inc., Secaucus, NJ, USA, 1990.
- [Wan99] X.G. Wang : A behavior-based inverse kinematics algorithm to predict arm prehension for computer-aided ergonomic evaluation. *Journal of Biomechanics*, 32(5):453–460, Mai 1999.
- [War02] C.V. Ward : Interpreting the nature and locomotion of Australopithecus Afarensis : where do we stand ? *Yearbook of Physical Anthropology*, 45:185–215, 2002.
- [WB03] J. Wang et B. Bodenheimer : An evaluation of a cost metric for selecting transitions between motion segments. *Dans SCA'03 : Proceedings of the 2003 ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation*, pages 232–238, 2003.
- [WH97] D.J. Wiley et J.K. Hahn : Interpolation synthesis of articulated figure motion. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 17(6):39–45, Novembre 1997.
- [Whi69] D.E. Whitney : Resolved motion rate control of manipulators and human prostheses. *IEEE Transactions on Man-Machine Systems*, MMS-10(2):47–53, Juin 1969.
- [Whi91] M.W. Whittle : *Gait analysis : An introduction*. Oxford : Butterworth-Heinemann, 1991.
- [Win90] D.A. Winter : *Biomechanics and motor control of human movement*. John Wiley and Sons, Inc., seconde édition, Toronto, USA, 1990.
- [WK88] A.P. Witkin et M. Kass : Spacetime constraints. *SIGGRAPH'88 on Computer Graphics*, 22(4):159–168, Août 1988.
- [WP95] A.P. Witkin et Z. Popović : Motion warping. *Dans Proceedings of SIGGRAPH'95*, pages 105–108, Août 1995.
- [YN03] K. Yamane et Y. Nakamura : Dynamics filter - concept and implementation of online motion generator for human figures. *IEEE Transactions on robotics and automation*, 19(3):421–432, Juin 2003.
- [ZB94] J. Zhao et N.I. Badler : Inverse kinematics positioning using nonlinear programming for highly articulated figures. *ACM Transactions on Graphics*, 13(4):313–336, 1994.
- [Zel82] D. Zeltzer : Motor control techniques for figure animation. *IEEE Computer Graphics and Application*, 2(9):53–59, Novembre 1982.
- [Zel83] D. Zeltzer : Knowledge-based animation. *Dans ACM SIGGRAPH/SIGART*, pages 187–192, Avril 1983.

- [ZMCF05] V.B. Zordan, A. Majkowska, B. Chiu et M. Fast : Dynamic response for motion capture animation. *ACM Transactions on Graphics*, 24(3):697–701, 2005.
- [ZSC90] V. Zatsiorsky, V. Seluyanov et L.G. Chugunova : Contemporary problems of biomechanics. *Dans Methods of determining mass-inertial characteristics of human body segments*, pages 273–291, 1990.
- [ZV03] V.B. Zordan et C. Van Der Horst : Mapping optical motion capture data to skeletal motion using a physical model. *Dans ACM Siggraph / Eurographics Symposium on Computer Animation*, pages 245–250, 2003.

Définition et réalisation d'outils de modélisation et de calcul de mouvement pour des humanoïdes virtuels

Comprendre et animer des mouvements humains sont intimement liés aux approches d'analyse et de synthèse. Ces approches soulèvent des problèmes fondamentaux dans de nombreux domaines scientifiques tels que la biomécanique, l'anthropologie et l'animation. Obtenir des mouvements animés réalistes est un point hautement délicat et complexe face à la perception exercée d'un observateur. Nous étudions et réalisons donc une chaîne complète et cohérente d'analyse et de synthèse de locomotions humaines qui certifie le respect de critères de réalisme du mouvement. Cette chaîne est composée d'une méthode d'adaptation cinématique, d'un procédé de validation dynamique de cette méthode et d'une méthode de synthèse en dynamique directe. Nous proposons dans chacune de ces trois parties, des méthodes de modélisation de l'humain, des méthodes de modélisation du mouvement et des méthodes de calculs du mouvement. Nous orientons ces travaux sur des méthodes d'adimensionnement et de manipulation d'une base de données de mouvements.

Mots clés : Analyse et synthèse de mouvement, adaptation cinématique, dynamique inverse et directe, modélisation de l'humain et du mouvement

Definition and realisation of modeling methods and motion computation algorithms for virtual humans

Understanding and animating human motions are closely related to approaches of analysis and synthesis. These approaches raise crucial problems in many scientific fields such as biomechanics, anthropology and animation. Obtaining realistic animated motions is a highly delicate and complex issue when evaluated by the trained human eye. We study and realize in this thesis a complete and coherent chain of analysis and synthesis of human locomotions which certifies the respect of motion realism criteria. This chain is made up of a method of kinematical adaptation, of a dynamic process of validation of this method and of a method of forward dynamics synthesis. We propose for each of these three parts, methods of human modeling, methods of motion modeling, and methods of motion computation. We focus our work on methods of normalisation and manipulation of a database of motions.

Keywords : Motion analysis and synthesis, kinematical adaptation, inverse and forward dynamics, human and motion modeling