
HABILITATION À DIRIGER DES RECHERCHES

présentée devant

L'Université de Rennes 1
Spécialité : informatique

par

Franck Multon

Analyse, Modélisation et Simulation du Mouvement Humain

soutenue le 8 décembre 2006 devant le jury composé de :

M.	Daniel Herman	Président
M.	Ronan Boulic	Rapporteur
M.	Eric Berton	Rapporteur
Mme	Jessica Hodgins	Rapporteur
M.	Jean-Paul Laumond	Examineur
M.	Robert McNeill Alexander	Examineur
M.	Alain Berthoz	Invité

à ma fille Maëva et à ma femme Gwenaëlle,

"Si ton œil était plus aigu tu verrais tout en mouvement" Friedrich Nietzsche

Remerciements

Je tiens d'abord à remercier les membres du jury, en particulier Jessica Hodgins, Professeur à Carnegie-Mellon University, Ronan Boulic, Adjoint Scientifique à l'EPFL et Eric Berton, Professeur à l'Université Marseille pour avoir accepté d'être rapporteurs. Je remercie ensuite Daniel Herman, Professeur à l'Université Rennes 1, pour avoir accepté de participer à ce jury et de le présider, Jean-Paul Laumond, Directeur de Recherche au LAAS-CNRS, Robert McNeill Alexander, Professeur à Leeds University et Alain Berthoz, Professeur au Collège de France, pour leur participation à ce jury.

J'adresse ensuite un grand merci à Hélène Beaupied, Stéphane Ménardais, Benoît Bideau, Carole Durocher, Richard Kulpa, Guillaume Nicolas, Alexis Héloir et Hubert Gain, qui reconnaîtront dans ce manuscrit leur travail et parfois même des morceaux de leurs thèses. J'ai eu plaisir à encadrer leurs travaux. Je remercie aussi les stagiaires et ingénieurs qui ont aussi apporté leur contribution à ces travaux : Sébastien Canneçu, Nicolas Fusco et Jean-Marie-Hénaff. J'en profite pour remercier les personnes que j'encadre actuellement et qui m'ont permis, par leur autonomie et leurs qualités, de me consacrer à la préparation de cette HDR : Mickaël Brossard, Ludovic Hoyet, Nicolas Chaverou et Yann Pinczon du Sel.

Je suis extrêmement redevable aux projets SIAMES (devenu Bunraku) de l'IRISA et au LPBEM (devenu M2S) de l'Université Rennes 2, car ils m'ont permis de développer une thématique qui me passionne et qui m'a conduit à présenter cette HDR. Je remercie en particulier Bruno Arnaldi qui a toujours su être de bon conseil et me guider intelligemment dans ma carrière, Stéphane Donikian pour sa confiance et ses conseils. Je tiens à remercier particulièrement Paul Delamarche qui a eu la clairvoyance de recruter un jeune docteur en informatique pour développer une équipe en STAPS, à l'Université Rennes 2. J'espère toujours me montrer digne de son choix. Je pense bien évidemment aussi à tous mes collègues des deux laboratoires pour leur bonne humeur, les bons moments passés et les échanges qui ont aussi contribué à déboucher sur le travail présenté dans cette HDR.

Je remercie enfin tous ceux qui m'ont apporté encouragements, aides et soutiens :

- les membres du projet SIAMES, et particulièrement Kadi Bouatouch pour ses conseils, son aide et sa disponibilité, ainsi que Georges Dumont pour sa bonne humeur et son aide dans la préparation de cette HDR,
- Stéphane Vieilledent pour sa relecture minutieuse du document dans des moments difficiles pour lui... à charge de revanche,
- Gilles Berillon pour sa confiance et les longues discussions qui nous ont conduit à rapprocher des sciences très éloignées,
- Marie-Paule Cani pour son support et ses précieux conseils ; elle a toujours su me guider et m'encourager dans mes démarches,
- ma femme Gwenaëlle pour son affection, son aide, son soutien et sa patience (désolé pour tous les repas passés en face d'un ordinateur plutôt que ton mari),
- mes parents qui ont toujours su me porter en m'encourageant pour me dépasser.

Je n'ai pas assez de place pour adresser mes remerciements à toutes les personnes avec qui j'ai travaillé au cours des nombreux projets et qui ont indirectement contribué à cette HDR. Merci !

Table des matières

1	Introduction	13
2	Préambule	19
2.1	Présentation du problème	19
2.2	Proposition d'une solution	22
3	La simulation au service de la compréhension du mouvement humain	25
3.1	Problématique	26
3.1.1	Les modèles cinématiques	29
3.1.2	La planification	29
3.1.3	Les modèles dynamiques	30
3.1.4	Le mélange de mouvements	31
3.1.5	L'édition de mouvements capturés	33
3.1.6	L'extraction de style	34
3.1.7	Bilan	35
3.2	Proposition d'un module de simulation de mouvements	36
3.2.1	Aperçu global de <i>MKM</i>	36
3.2.2	Synchronisation et mélange	39
3.2.3	Adaptation de mouvements	41
3.2.4	Prise en compte du centre de masse	45
3.2.5	Prise en compte de la dynamique	49
3.2.6	Prise en compte des émotions	53
3.3	Conclusion et perspectives	56
4	Réalité virtuelle pour la validation des animations calculées	61
4.1	Problématique	62
4.1.1	La présence en environnement virtuel	62
4.1.2	Définition du cas d'étude	64
4.2	Protocole de test utilisant la réalité virtuelle	65
4.2.1	Expérimentation dans l'environnement réel	67
4.2.2	Animation du tireur virtuel	68
4.2.3	Expérimentation en environnement virtuel	68
4.2.4	Résultats	71
4.3	Conclusion et perspectives	74

5	Recherche de locomotions probables pour les espèces bipèdes	77
5.1	Revue de littérature sur la locomotion humaine	78
5.2	Analyses biomécaniques	81
5.2.1	Individualisation des paramètres anthropométriques	81
5.2.2	Analyse cinématique, dynamique et énergétique de la locomotion humaine	83
5.3	Simulation de la locomotion bipède	86
5.3.1	Cinématique inverse à partir d'une poulaine à tester	89
5.3.2	Déformation et évaluation de poulaines	92
5.4	Conclusion et perspectives	97
6	Conclusion et perspectives	99

Table des figures

1.1	Proposition de hiérarchie du contrôle d'un humanoïde, adapté des travaux de A. Newell [Newel 90].	15
2.1	Synopsis montrant l'interaction entre analyse et synthèse du mouvement. . .	23
3.1	Proposition de classification des méthodes de génération de mouvements en fonction des contraintes qu'elles permettent de prendre en compte. . . .	28
3.2	Organisation générale d'un système dynamique en boucle fermé utilisant une description mécanique du squelette et un contrôleur pour minimiser la distance entre l'état courant et l'état désiré.	31
3.3	Graphe de mouvement obtenu à partir de 4 trajectoires (M_1 à M_4). Les cercles représentent les postures et les arcs les transitions possibles entre deux d'entre elles.	32
3.4	Aperçu global de <i>MKM</i> montrant les fonctionnalités de synchronisation, mélange et adaptation de mouvements stockés sous une forme indépendante de la morphologie dans une base de données.	37
3.5	Squelette normalisé permettant de coder le mouvement efficacement (données adimensionnelles et contraintes géométriques).	38
3.6	Interface permettant d'indiquer les phases d'appui et les autres contraintes dans des mouvements élémentaires isolés.	38
3.7	Opérateur indiquant le résultat du mélange de deux appuis (<i>Err</i> indique une impossibilité).	39
3.8	Synchronisation de trois mouvements ayant des priorités différentes. L'image du haut montre une incompatibilité au pas de temps $k + 2$. L'image du bas montre une solution consistant à étirer l'axe des temps à l'instant $k + 1$ de l'action S_2 sans toucher à S_3 qui a une priorité supérieure.	40
3.9	Mélange de mouvements de combat sur un sol mouvant impliquant une adaptation à l'environnement en temps réel.	41

-
- 3.10 Adaptation rapide de la posture à un sol non plat. Plusieurs étapes : (a) la posture de référence. (b) les positions initiales et désirées des chevilles sont déterminées. (c) La largeur du bassin est supprimée de toutes les positions afin d'exprimer les articulations relativement à la racine. (d) Trois hauteurs sont calculées : celle qui préserve la racine d'origine (h_1) et les deux hauteurs maximales que la racine peut atteindre si les jambes sont tendues. (e) La hauteur minimale est choisie afin de respecter les trois critères. (e) La largeur du bassin est ajoutée pour retrouver les positions finales des chevilles. (f) L'adaptation des jambes est alors automatique avec la représentation normalisée. 43
- 3.11 Décomposition du corps humain en groupes. Pour chaque groupe, un ensemble de solutions analytiques sont proposées pour résoudre toutes les contraintes pouvant lui être associées. 44
- 3.12 Adaptation d'une posture de référence (a) afin de positionner le pied du personnage sur une sphère. (b) Utilisation uniquement des jambes pour résoudre le problème. (c) Ajout d'une translation du bassin pour compléter la résolution. 45
- 3.13 Adaptation des membres en deux étapes. (a) Posture de référence. (b) La longueur variable du membre est changée de manière à placer COM_G à la même distance que COM'_G de l'épaule. (c) Une rotation est effectuée pour placer COM_G sur COM'_G 46
- 3.14 Stratégies de déplacement du centre de masse d'un personnage devant toucher une sphère placée loin devant lui. On impose aussi au personnage de placer son centre de masse de manière à conserver son équilibre (une sphère indiquant le centre de masse courant et l'autre la contrainte à respecter). a) aucun respect du centre de masse. b) $CnRacine = 0$, aucun déplacement du bassin pour contrôler la position du centre de masse. c) $CnRacine = 1$ résolution uniquement en bougeant le bassin. d) combinaison des deux stratégies. 47
- 3.15 Plusieurs personnages de taille différente doivent résoudre les mêmes contraintes (deux aux poignets et deux aux pieds) en respectant l'équilibre (une contrainte supplémentaire sur le centre de masse) et en temps réel. Les deux personnages superposés devant montrent la différence de posture si l'équilibre n'est pas contrôlé. 49
- 3.16 Zone dans laquelle le deuxième point de contrôle peut théoriquement se trouver. 51
- 3.17 Comparaison entre une trajectoire (altitude du centre de masse en (a) et sa dérivée en (b)) expérimentale et modélisée par un polynôme de degré 7 lors d'un saut vertical. 51
- 3.18 Décalage de la zone de recherche en fonction des conditions initiales et finales de position et de vitesse. La zone sombre correspond aux positions possibles pour P_2 dans le cas où le vecteur vitesse au décollage est celui représenté aussi en sombre (et réciproquement pour la zone claire). 52
- 3.19 Résultats montrant deux séquences de saut à différentes hauteur à partir d'un même mouvement initial. 52

3.20	Postures décrivant un bulletin météo réalisé avec le style "neutre" (en haut), en appliquant une transformation homogène du temps à partir d'un style "colère" (au milieu) et en appliquant notre méthode sur le même style (en bas).	55
3.21	Comparaison de trois méthodes de DTW appliquées à deux réalisations d'une même séquence gestuelle. 2 ^{me} ligne : DTW classique. 3 ^{me} ligne : DTW contraint. Dernière ligne : notre approche.	60
4.1	Organisation de l'expérimentation menée en réalité virtuelle avec un gardien de but réel, impliquant des mesures en condition réelle et des évaluations des mouvements exécutés en environnement simulé.	66
4.2	Capture de mouvements des deux joueurs évoluant en situation réelle (gardien à gauche, tireur à droite).	67
4.3	Différents mélanges possibles pour trois mouvements : course (1 ^{ere} ligne), tir en restant en appui (2 ^{eme} ligne) sur le sol et tir incluant un saut (3 ^{eme} ligne).	69
4.4	Copies d'écran d'un tir en suspension soumis aux sujets de l'expérimentation sur le duel tireur-gardien.	70
4.5	Corrélations moyennes (\pm écart type) entre les gestuelles des gardiens face à deux fois le même tir (colonne de gauche), lorsqu'on modifie la hauteur du poignet (2 ^{eme} colonne), le moment du lâcher (3 ^{eme} colonne) et l'orientation du buste (4 ^{eme} colonne). Les différences significatives ($p < 0.05$) par rapport à la 1 ^{ere} colonne sont indiquées par une *.	72
4.6	Mouvements du gardien face à un tireur virtuel effectuant un tir capturé (en haut) puis montant son poignet de 10cm (en bas).	73
4.7	Réponses aux 10 questions posées aux sujets après l'expérimentation. . . .	74
5.1	Cycle de locomotion pour les angles de flexion du membre inférieur inspiré des travaux de [Alexander 83].	79
5.2	Croisement des courbes d'énergie métabolique et de travail des forces internes pour différentes allures de marche et de course.	85
5.3	données ostéologiques (à gauche) et hypothèse de reconstruction (à droite) fournies par l'UPR 2147 CNRS en entrée du module de simulation de la marche. Photo G. Berillon, avec l'autorisation du Museum National d'Ethiopie.	87
5.4	Organisation globale des travaux menés sur la simulation de locomotions probables pour différents bipèdes principalement partir de données ostéologiques.	88
5.5	Représentations numériques de chaînes pelviennes d'un chimpanzé, d'un homme moderne, et de Lucy (A.L. 288-1).	89
5.6	Comparaison de trajectoires angulaires simulées et mesurées sur un sujet humain pour le pelvis, la hanche et le genou.	91
5.7	Points de contrôle initialement choisis sur la poulaine moyenne (axe longitudinal en Y, axe vertical en Z).	94

- 5.8 Poulaines obtenues après optimisation pour deux humains (à gauche), un chimpanzé (au milieu) et Lucy (à droite) et comparaison à la poulaine de référence. 95
- 5.9 Copies d'écran de la marche obtenue après optimisation sur les données ostéologiques d'un humain (à gauche), d'un chimpanzé (au milieu) et de Lucy (à droite). 96

Liste des tableaux

- 4.1 Corrélations(\pm écart type) entre les gestuelles des gardiens face à deux fois le même tir (colonne *Référence*), lorsqu'on modifie la hauteur du poignet (colonne *Poignet*), le moment du lâcher (colonne *Lâcher*) et l'orientation du buste (colonne *Buste*) pour chaque sujet. 71
- 5.1 Erreur moyenne (+écart type) entre trajectoires angulaires mesurées et simulées avec notre approche pour tous les sujets humains. 92

Chapitre 1

Introduction

Le mouvement humain est un enjeu socio-économique important qui a des répercussions dans de nombreux domaines d'application. Dans le domaine de la santé, la lutte contre l'obésité, le traitement et l'intégration des handicapés sont des problèmes clés de la société moderne. L'exercice physique est devenu un moyen de traitement reconnu de ces troubles et motive donc un grand nombre de recherches. L'informatique a évidemment sa place dans ces travaux en fournissant des outils d'analyse, de compréhension et de traitement qui impliquent bien évidemment une communication importante entre les différentes disciplines scientifiques : nutrition, physiologie, médecine, biomécanique, neurosciences, sciences du sport, physique, mécanique, automatique... L'industrie du sport grand public s'appuie d'ailleurs sur ces préoccupations (santé et, plus particulièrement, obésité) pour proposer des produits issus des résultats de recherche de ces différentes disciplines.

Le sport est d'ailleurs maintenant associé à une véritable industrie qui rivalise de prouesses techniques pour diffuser et enrichir les grands rendez-vous comme les jeux olympiques, les coupes du monde ou le tour de France. C'est là-aussi l'occasion de diffuser au grand public les résultats les plus récents en terme de développements technologiques, de connaissances des mouvements et des performances mises en jeu. Pour certaines fédérations sportives et leurs centres d'entraînement, la recherche de performance passe parfois par des outils d'évaluation et de programmation d'entraînement qui utilisent des résultats issus parfois directement de travaux de recherches récents. Les compétitions se gagnent souvent sur de très faibles différences entre les sportifs, ce qui nécessite des techniques très performantes de mesure et de compréhension des mouvements mis en jeu, entre autre.

Parallèlement, dans le domaine du multimédia, le mouvement humain a, lui-aussi, pris une grande importance avec l'utilisation massive des images de synthèse dans la production audiovisuelle et dans les jeux vidéos. Synthétiser des humains virtuels crédibles implique, entre autre, des outils performants d'édition ou de simulation du mouvement. Cette crédibilité est difficile à définir puisqu'elle peut intervenir à plusieurs niveaux de la synthèse : calcul de mouvements qu'un humain réel aurait naturellement produits, rendu de l'image, environnement dans lequel est perçu l'animation... En plus de ces facteurs "technologiques", l'état psychologique des sujets qui perçoivent l'animation joue aussi un rôle [Slater 93]. C'est un problème particulièrement crucial en réalité virtuelle, pour le développement de

logiciels crédibles de formation dans de nombreux domaines d'application. Par exemple, la formation au commandement dans des équipes implique presque obligatoirement la gestion du mouvement d'humains synthétiques. En dehors de ces problèmes de formation, l'évaluation de l'usage des infrastructures et de leur niveau de sécurité par la simulation devient un enjeu économique très important. Cela comprend, par exemple, la modélisation d'aménagements de bâtiments (comme les gares ou les aéroports) afin de simuler comment les usagers pourraient y naviguer.

Malgré la quantité de travaux de recherche menés dans les différents domaines, le système locomoteur humain et son fonctionnement soulèvent encore de nombreuses questions. En effet, le corps humain est terriblement complexe car il fait intervenir un très grand nombre d'os et de tissus dont l'organisation reste parfois mal connue. Il faut ajouter à cela la complexité du système neuro-musculaire, des différents sens et de leur analyse par le cerveau. Il serait donc nécessaire de maîtriser une quantité incroyable de connaissances pour comprendre parfaitement le mouvement humain. Le système nerveux central ne peut pas tout contrôler de manière unitaire et cherche donc des simplifications en réduisant, par exemple, le nombre de degrés de liberté à contrôler [Bernstein 67, Vereijken 92].

De plus, l'être humain est ouvert sur l'extérieur. A partir des informations reçues par les différents sens, plusieurs mécanismes conscients ou inconscients lui permettent de s'adapter à son environnement afin d'effectuer des tâches complexes. Parmi les mécanismes inconscients, on peut citer la transformation de l'énergie chimique en énergie mécanique au niveau des muscles. Les mécanismes conscients impliquent, par exemple, un raisonnement basé sur des processus neurologiques complexes. Tous ces mécanismes sont généralement impliqués dans ce que l'on appelle la "boucle de perception, décision et action". Maîtriser la totalité de ces phénomènes est, pour l'instant, illusoire et les résultats de recherche permettent d'en comprendre quelques un, isolément des autres. Ainsi, on comprend relativement bien comment le muscle transforme l'énergie chimique en mouvement. On comprend aussi le rôle important du système vestibulaire (organes placés à proximité des oreilles) dans le contrôle de l'équilibre. Cependant, il est quasiment impossible de suivre précisément tous les processus qui vont de l'information prélevée par ce système vestibulaire jusqu'à la dégradation des molécules d'ATP¹ qui fournissent de l'énergie aux muscles.

Les différents modèles proposés dans la littérature, quel que soit le domaine scientifique, s'appuient donc sur des simplifications du système réel humain : le système étudié est relativement précis alors que le reste est grandement simplifié. Par exemple, en neurosciences, il est courant de rechercher les différentes perceptions qui conduisent à l'exécution d'une tâche en se focalisant sur les angles entre les articulations et non sur les transformations physico-chimiques qui interviennent auprès de chaque muscle. D'ailleurs, une hypothèse bien admise indique qu'il existerait une sorte de système hiérarchisé de contrôle [Berthoz 03]. Du point de vue de l'automatique, cela se rapprocherait d'un système de blocs fonctionnels communiquant entre eux sans connaître comment fonctionnent précisément les autres. On retrouve ce principe en automatique où les systèmes dont on ne connaît pas la structure interne mais pour lesquels on peut donner un comportement externe sont appelés "boîte noire". Ces représentations s'opposent aux modèles dit "boîte blanche" pour lesquels on connaît particulièrement bien la structure et le fonctionnement du système.

¹ATP : adénosine triphosphate qui constitue le principal substrat énergétique chimique (ou carburant) consommé pour la contraction musculaire.

On pourrait donc dire qu'il n'y a pas de lien direct entre les informations sensorielles et les réactions chimiques mais qu'il existe une cascade de traitements pour effectuer ce lien. En étudiant le lien entre perception et angles inter-segmentaires, on suppose que le lien avec les réactions chimiques est correctement effectué par un autre système qu'on ne modélise donc pas.

En animation par ordinateur, la simplification de l'être humain est évidente puisque, dans la plupart des cas, l'objectif est de calculer un mouvement qui soit visuellement crédible. C'est ce qui différencie principalement l'animation de la simulation. Dans la suite du document, j'emploie le terme animation quand il est question de produire une séquence en images sans se soucier de la justesse et de la précision du modèle utilisé. A l'inverse, la simulation repose sur des modèles qui doivent être confrontés à des données réelles, pour validation. Il est communément admis de représenter le contrôle du mouvement d'un humanoïde de manière hiérarchique, comme le montre la figure 1.1 tirée de l'HDR de S. Donikian [Donikian 04] et adaptée de A. Newell [Newel 90]. S. Donikian propose d'utiliser la hiérarchie de contrôleurs de Newel en animation par ordinateur afin de simuler des comportements complexes d'humains virtuels.

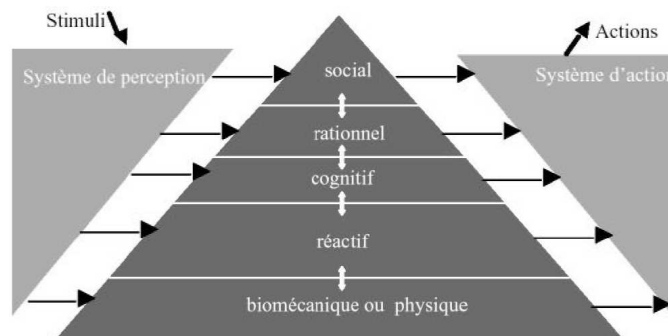


FIG. 1.1 – Proposition de hiérarchie du contrôle d'un humanoïde, adapté des travaux de A. Newell [Newel 90].

Au niveau biomécanique ou physique, il est courant de représenter le corps humain par un système de corps rigides (généralement les os ou un groupement d'os) articulés grâce à des liaisons mécaniques parfaites autorisant principalement des rotations. On ajoute à cela les méthodes nécessaires pour reproduire des trajectoires articulaires qui produisent une animation visuellement crédible. Ensuite, plus on monte dans la hiérarchie et plus l'humanoïde est capable d'effectuer des tâches complexes, nécessitant du raisonnement, en s'appuyant sur les couches inférieures. Même si le système est largement simplifié par rapport à un être humain réel, il n'existe pas, à ma connaissance, de système complet qui parcourt la totalité de cette pyramide. A chaque niveau, par contre, on rencontre des travaux qui proposent une modélisation plus ou moins fine des phénomènes mis en jeu. Au niveau biomécanique, on peut par exemple modéliser l'épaule par une simple rotule (comportant 3 axes de rotation) ou par un système beaucoup plus complexe incluant la clavicule et l'omoplate (ou scapula). Quel que soit le niveau de modélisation choisi, l'objectif est tout de même de reproduire des mouvements qui fassent paraître l'humanoïde relativement

humain.

Dans le domaine des robots humanoïdes, les spécifications techniques du système mécanique à déplacer sont connues. Même s'ils sont de plus en plus complexe, on dispose de la majorité des connaissances nécessaires sur la structure poly-articulée et les servomoteurs utilisés pour le faire bouger. Contrairement à la simulation qui se base sur une représentation numérique, les robots humanoïdes sont malgré tout sujets à des aléas et des imprécisions. En effet, les pièces mécaniques et l'environnement réel peuvent apporter un côté aléatoire qui conduit à une problématique légèrement différente. Malgré quelques rares tentatives d'imitation de l'anatomie humaine, ces robots ont des données anthropométriques relativement différentes de celles des humains. Cette connaissance parfaite de la couche "biomécanique" (si on se réfère à la figure précédente) permet d'expérimenter plusieurs modèles de contrôleurs qui donnent de l'autonomie au robot. Cependant, contrairement à l'animation par ordinateur, l'objectif principal n'est généralement pas de reproduire un geste visuellement humain. Le but est principalement d'effectuer une tâche en tenant compte de la réalité physique de l'environnement dans lequel le robot évolue. Quelques travaux récents ont cherché à reproduire des gestes relativement naturels. Cependant, comme la structure poly-articulée et les actionneurs du robot sont différentes de ceux d'un humain, cela reste une tâche difficile. Ainsi, les robots humanoïdes marchent généralement genoux fléchis car, en position "jambe tendue" il y a de nombreux problèmes d'instabilité (déséquilibre et instabilités numériques). De même, les moteurs installés aux articulations ne permettent pas de générer des forces avec une finesse et une amplitude suffisante pour reproduire une gestuelle humaine. Les robots humanoïdes parviennent toutefois à résoudre de plus en plus de tâches (locomotion, préhension, manipulation d'outils) même s'ils adoptent des stratégies locomotrices différentes de celles naturellement choisies par des humains.

Tous les points précédents montrent des problématiques différentes tournant malgré tout autour du même problème : le contrôle moteur. Chaque discipline a développé sa méthodologie propre mais il paraît important d'adopter une approche pluri-disciplinaire pour mieux comprendre et simuler le mouvement humain. C'est ce besoin de pluridisciplinarité qui explique mon cursus. J'ai suivi une formation relativement classique en informatique qui m'a conduit à préparer un doctorat en 1995 au sein du projet SIAMES (Synthèse d'Images, Animation, Modélisation Et Simulation) de l'IRISA dans le domaine de l'informatique graphique. Le sujet portait sur le "contrôle du mouvement des humanoïdes de synthèse" et s'intéressait donc à l'animation de personnages synthétiques. Très rapidement, le sujet m'a amené à m'intéresser au domaine de la biomécanique afin de proposer des modélisations du système locomoteur humain. Une première contribution m'a amené à modéliser l'évolution des angles au niveau des différentes articulations (appelés trajectoires articulaires) pendant la locomotion humaine. J'ai utilisé des données expérimentales et des travaux issus du domaine de la biomécanique pour simuler des mouvements naturels.

Une deuxième contribution m'a permis de me focaliser sur l'épaule et le bras qui nécessitaient une connaissance de l'anatomie humaine et de la manière dont fonctionnaient les articulations mises en jeu. Au sein d'un partenariat européen (projet CHARM terminé en 1997), nous avons ainsi défini un modèle biomécanique du membre supérieur humain, à partir des données du projet "Visible Human". Contrairement à la contribution précédente, ce travail nécessitait une modélisation très précise du squelette et la prise en compte de données anthropométriques nécessaires pour effectuer une simulation mécanique. Nous avons

alors proposé plusieurs méthodes permettant de générer un ensemble de gestes à partir de ce modèle et comparé les résultats à des données expérimentales. Ce travail a clairement montré la complexité de modéliser finement le système moteur humain et la difficulté à mettre en place des protocoles précis de validation.

La dernière contribution de ma thèse portait sur un contrôle réactif et ayant quelques capacités prédictives, afin d'effectuer des tâches complexes. L'idée était de pouvoir offrir à l'humanoïde une représentation numérique du monde qui intègre la notion de temps. Ainsi, un jongleur est capable de prédire qu'il ne va pas pouvoir attraper une balle sans lancer celle qu'il tient actuellement dans sa main. Le résultat montrait un comportement émergent simple de jonglage à partir de quelques règles du type "si j'ai la main prise, envoyer la balle en l'air à destination d'une main qui sera libre plus tard". Ce problème a aussi été étudié et continue de l'être en neurosciences [Schaal 96, Post 00, Huys 04]. A l'avenir, il semble donc encore une fois pertinent de chercher à regrouper les compétences issues de chaque discipline autour d'une telle problématique, commune.

Ma nomination au Laboratoire de Physiologie et Biomécanique de l'Exercice Musculaire (LPBEM) de l'Université Rennes 2 m'a ensuite donné la chance de poursuivre et d'approfondir ce lien entre les sciences expérimentales du mouvement et l'informatique. Je suis alors passé d'une problématique issue de l'animation par ordinateurs à une problématique biomécanique. L'idée était de développer de nouvelles approches inspirées de celles développées en animation pour proposer et tester des hypothèses sur le contrôle moteur humain. Bien que tous les niveaux présentés dans la hiérarchie de Newel (cf. figure 1.1) jouent un rôle important pour le contrôle moteur, je me suis limité au premier d'entre eux : le niveau biomécanique et physique. Dans ce document, j'aborde donc trois principales contributions développées depuis ma thèse qui s'inscrivent dans cette philosophie. Au préalable, le chapitre 2 donne un préambule afin de montrer comment les sciences expérimentales et l'informatique peuvent cohabiter. Dans ce préambule, je propose un synopsis général d'interaction entre analyse et synthèse du mouvement qui sert de trame à toute la suite du document. J'ai volontairement choisi de ne pas présenter un état de l'art général à tout le document car les domaines concernés sont très larges. Par contre, pour chaque contribution, le document présente un état de l'art spécifique qui intègre les différents domaines concernés : principalement, animation par ordinateur, biomécanique et neurosciences.

Chapitre 2

Préambule

De nombreux domaines scientifiques s'intéressent au mouvement humain. L'objectif de ce préambule est de préciser la problématique liée à mes travaux de recherches. La section 2.2 décrit la philosophie avec laquelle j'ai proposé de répondre à cette problématique.

2.1 Présentation du problème

Le mouvement humain est, par nature, un phénomène intéressant de nombreuses disciplines scientifiques. Depuis les travaux de J.E. Marey [Marey 73], il y a plus de 100 ans, qui dirigeait la chaire "d'histoire naturelle du corps organisé" au Collège de France, plusieurs disciplines scientifiques ont effectivement vu le jour, parmi lesquelles on peut citer la physiologie de l'exercice physique, la biomécanique, les neurosciences comportementales, l'anatomie fonctionnelle, les sciences du sport... Chacune de ces disciplines expérimentales a proposé des protocoles pour standardiser les situations expérimentales en utilisant, par exemple, un tapis roulant afin d'imposer une même vitesse à tous les sujets. En standardisant les situations expérimentales, on espère limiter l'influence de paramètres qui ne sont pas pris en compte dans le raisonnement théorique. Par exemple, si le but est de voir en quoi un handicap influence la consommation énergétique de la marche, on compare généralement l'énergie dépensée par les sujets sains et les sujets pathologiques. Evidemment, comme la dépense énergétique varie aussi en fonction de la vitesse, l'utilisation du tapis roulant permet d'éliminer le facteur vitesse pour tenter d'isoler uniquement l'influence de la pathologie. Cependant, les différentes tentatives montrent qu'il est très difficile d'isoler parfaitement le paramètre à analyser, particulièrement pour des phénomènes mals connus. On ne sait alors pas quels paramètres rentrent réellement en ligne de compte. Pour s'en convaincre, il suffit de relever les nombreux désaccords qui existent dans différents domaines des sciences expérimentales. Par exemple, on s'interroge toujours actuellement sur la loi (appelée "loi de puissance" [Vieilledent 01, Hicheur 05b]) permettant de modéliser le profil de vitesse de quelqu'un se déplaçant le long d'une trajectoire curviligne. Il y aurait une relation entre la courbure et la vitesse tangentielle. Des études récentes montrent que cette loi pourrait aussi prendre en compte la forme de la trajectoire (ellipsoïdale, en huit...). Ces résultats complémentaires ont justement permis de démontrer que certains paramètres

ne suffisaient par à expliquer à eux seuls la production des mouvements humains. Il est évident que l'état cognitif du sujet joue aussi un rôle important dans la production de ce type de trajectoires.

Si on cherche maintenant à synthétiser le mouvement d'un humanoïde, on est immédiatement confronté à plusieurs problèmes. Comme nous l'avons vu dans l'introduction, il est illusoire de chercher à modéliser l'être humain dans sa totalité, avec plus de 200 os et encore plus de muscles [Gray 18]. Ceci conduirait à un grand nombre d'imprécisions et à une explosion combinatoire. Il est donc nécessaire de trouver une représentation simplifiée du système musculo-squelettique humain. Dans les différentes approches de simulation du mouvement, la représentation la plus répandue consiste à utiliser un ensemble limité de segments rigides articulés entre eux par des liaisons mécaniques parfaites. Un segment peut représenter un os (c'est le cas pour le fémur, par exemple) ou un ensemble d'os (le meilleur exemple est la colonne vertébrale représentée parfois par un unique segment). Les liaisons mécaniques les plus couramment utilisées sont des combinaisons de 1 à 3 pivots (un axe de rotation par pivot). Le squelette est représenté sous forme d'arbre avec une racine (généralement placée au niveau du bassin), des feuilles représentant les segments proches des extrémités (tête, mains, pieds) et des nœuds correspondant aux segments intermédiaires.

L'intérêt de cette représentation est qu'une modification de la liaison appliquée à un nœud se répercute de manière automatique sur tout le sous-arbre fils. Ainsi, une rotation au niveau de l'épaule entraîne automatiquement la rotation de tous les segments constituant le bras et pas uniquement l'humérus. Ainsi, à chaque liaison, il est uniquement nécessaire d'indiquer les rotations du fils de la liaison (par exemple l'avant-bras) par rapport à son père (le bras) sans se soucier de son orientation dans le repère global. La racine de cet arbre est généralement la seule à subir à la fois des rotations et des translations qui modélisent le déplacement global du personnage. On obtient donc un ensemble de degrés de liberté comportant généralement 6 valeurs (3 de translation et 3 de rotation) pour la racine, puis de 1 à 3 valeurs de rotation pour chaque liaison. Le système musculo-squelettique est donc réduit à ce simple ensemble de degrés de liberté (évoluant avec le mouvement) et à la connaissance des dimensions de chaque segment du personnage (constant). En fait, ces représentations se basent sur le principe de muscle équivalent [Zajac 90] qui se traduit par modéliser uniquement la résultante des couples appliqués par les différents muscles mis en jeu. Pour représenter les rotations en 3D, on utilise principalement des angles d'Euler, des quaternions, ou directement des matrices de changement de repère (se reporter à [Watt 92] pour plus de renseignements). En robotique, il est courant d'utiliser le formalisme de Denavit-Hartenberg [Hartenberg 64] dont la philosophie reste cependant proche de ce qui vient d'être décrit. En animation, une norme a été définie pour décrire le corps humain à partir de ce type de représentation tout en autorisant la prise en compte ou non d'un segment corporel. Ainsi, si la représentation géométrique du personnage ne comprend qu'un seul segment pour représenter le torse, tous les nœuds liés à la colonne vertébrale sont neutralisés tout en restant compatible avec cette norme, appelée H-ANIM [H-ANIM 01] (ISO/IEC FCD 19774). Dans ces représentations, le mouvement est décrit par l'évolution des degrés de liberté au cours du temps, fournissant ce que l'on appelle des trajectoires articulaires.

Cette représentation simplifiée est, dans la plupart des cas, compatible avec celle utilisée en biomécanique et en neurosciences. Là-aussi, le corps humain est simplifié en segments rigides articulés par des liaisons mécaniques. Là-aussi, une norme a été défi-

nie par l'"International Society of Biomechanics (ISB)" pour les différentes parties du corps [Wu 02, Wu 05]. En plus de cette représentation très simplifiée, Scott Delp a proposé une représentation musculo-squelettique relativement complète du corps humain, intégrant un grand nombre de muscles [Delp 95]. Cette représentation a été reprise plus récemment en robotique [Nakamura 05]. Ce type de représentation pose un grand nombre de problèmes puisque la localisation des insertions musculaires joue un rôle significatif dans le calcul des forces mises en jeu, alors que ces données ne sont généralement pas disponibles pour les sujets étudiés. De plus, les forces calculées par ces méthodes ne peuvent pas être validées formellement en raison des problèmes expérimentaux posés par la mesure in-vivo des forces engendrées par chaque muscle. Comme il y a un très grand nombre de muscles comparativement au nombre de segments, le système mécanique est redondant ; il existe alors une infinité de solutions pour activer les muscles étant donné un mouvement imposé aux segments. Si on cherche à synthétiser un mouvement à partir de ce type de description, cette redondance pose le même type de problèmes. Pour conclure avec cette représentation, on peut dire qu'elle a un intérêt évident dans des applications chirurgicales [Delp 90] mais qu'elle semble peu applicable pour un grand nombre d'autres problèmes. En effet, comme nous l'avons vu en introduction, on peut se focaliser sur les trajectoires articulaires ou la résultante de l'action des muscles sur l'articulation (appelé moment résultant). On suppose alors que les muscles sont capables de réaliser cette action.

Un autre problème concerne la commandabilité (ou contrôlabilité) du système. C'est un problème particulièrement étudié en robotique dans l'objectif de faire effectuer une tâche complexe à un système mécanique poly-articulé. En simulation, le problème est le même bien que les modèles numériques soient moins contraignants que les systèmes mécaniques réels. En effet, on peut négliger de tenir compte de l'équilibre en animation alors que c'est un problème crucial pour un robot.

Enfin, il faut pouvoir rendre naturel le mouvement synthétisé, c'est à dire générer des trajectoires qu'un être humain aurait naturellement choisies. De la même manière que l'anatomie humaine a été simplifiée pour répondre à des problèmes de contrôlabilité, il semble utopique de chercher à simuler finement tous les phénomènes complexes intervenant dans la génération du mouvement naturel. C'est à la fois dû à un problème de modélisation mais aussi au fait que l'on ne connaît pas encore tous ces phénomènes. Par exemple, plusieurs explications peuvent être données au profil de vitesse type du mouvement d'un bras décrivant une ellipse [Lacquaniti 83]. On peut imputer ce phénomène à des simplifications du système de contrôle ou au contraire avoir une interprétation plus mécanique du phénomène [Gribble 96, Schaal 01]. Le débat est encore ouvert sur de nombreux points et les résultats sont régulièrement remis en question au fur et à mesure des progrès technologiques portant sur les moyens d'investigation, sur les protocoles expérimentaux et sur les connaissances fondamentales. Ainsi, J.E. Marey [Marey 73] et E. Muybridge [Muybridge 87], il y a plus de 100 ans, grâce à l'apparition de la chronophotographie avaient pu montrer pour la première fois que le galop du cheval comportait une phase pendant laquelle une unique patte était en contact avec le sol alors qu'il était défini comme une succession d'appuis bipodaux et de vols. Cependant, en animation par ordinateur, de nombreux travaux ont cherché à modéliser les mouvements humains à partir de ce type de description cinématique dans le but de rendre les séquences plus réalistes visuellement. Le postulat est que plus on ajoute de connaissances sur le mouvement humain, meilleures sont les animations,

si on s'abstrait du problème de rendu graphique. Depuis un grand nombre d'années, le lien allant des sciences expérimentales vers les sciences et techniques a donc donné lieu à de nombreux travaux. On peut citer, parmi de nombreux autres, les travaux de D. Zeltzer [Zeltzer 82] et de R. Boulic [Boulic 90] en animation, qui ont utilisé des résultats montrant la forme type de trajectoire articulaire observée pendant la marche humaine (comme ceux d'Alexander [Alexander 83]).

Plus récemment, le couplage entre l'analyse et la synthèse du mouvement humain a permis de porter les méthodes développées en simulation vers les domaines expérimentaux. C'est le cas en neurosciences qui s'appuient parfois sur des connaissances en physique ou en automatique pour étudier le contrôle moteur. Certaines équipes, comme le laboratoire "Mouvement et Perception" de Marseille, cherchent d'ailleurs à modéliser ce contrôle moteur en utilisant le formalisme directement issu de l'automatique. La modélisation numérique et la simulation sont donc maintenant largement employées pour chercher à vérifier des hypothèses sur le contrôle moteur. C'est dans ce cadre que se situent les travaux présentés dans cette habilitation à diriger les recherches.

Le principal intérêt de la simulation est de pouvoir tester isolément l'influence d'un ensemble de paramètres, contrairement à ce qu'il est possible de faire sur des sujets réels. De plus, le fait de chercher à simuler un système implique d'être capable de le modéliser et, donc, d'en avoir une certaine compréhension (ou tout du moins de valider des hypothèses). Ainsi, on se place dans une dynamique de recherche qui se focalise sur la genèse du mouvement naturel plutôt que sur les relations statistiques d'un paramètre avec un autre. Toutefois, comme nous l'avons vu, il est illusoire de vouloir modéliser toutes les subtilités de l'anatomie, voire de la physiologie humaine. Cela poserait des problèmes de modélisation et de simulation, mais surtout impliquerait que l'on soit capable de mesurer et chiffrer la totalité des paramètres mis en jeu. Le problème revient donc à proposer le modèle le plus adapté au problème à étudier, c'est à dire un système qui permette de faire varier uniquement les paramètres à étudier. Si on cherche, par exemple, à connaître l'influence des mouvements de bras dans la génération de rotations pendant des mouvements aériens (en gymnastique, par exemple), il est a priori inutile de modéliser l'évolution de la fréquence cardiaque ou les forces appliquées indépendamment par chaque muscle du squelette.

2.2 Proposition d'une solution

Plutôt que d'aborder le problème en partant d'une modélisation fine du système humain, nous proposons une approche qui consiste à travailler directement sur le mouvement. Ceci consiste à s'intéresser directement aux formes des trajectoires (modèles dits "descriptifs") sans chercher à comprendre les structures responsables de leur production, à l'inverse de modèles dits "causaux" qui se cherchent à modéliser finement les actionneurs responsables de la production d'un mouvement. L'approche par modèle descriptif est couramment rencontrée dans la communauté "animation par ordinateurs" et est complémentaire des approches robotiques qui sont liées par nature au système mécanique à commander. Le problème revient effectivement à reproduire des effets naturels sans pour autant obligatoirement en maîtriser toutes les causes. Dans l'exemple du mouvement gymnique, cela reviendrait à dire qu'on ne cherche effectivement pas à calculer les forces nécessaires à chaque muscle pour engendrer le mouvement de bras, mais qu'on cherche à savoir com-

ment la rotation du personnage est influencée par le déplacement imposé d'un bras ayant des propriétés de masses et d'inertie. Alors que l'animation par ordinateur a utilisé depuis longtemps des connaissances issues des sciences expérimentales, l'originalité des travaux présentés dans ce document est de proposer un réel couplage entre les techniques d'animation et les recherches sur la compréhension du mouvement humain.

Ces travaux s'inscrivent donc dans le schéma décrit en figure 2.1. Les analyses pratiquées en biomécanique ou en neurosciences permettent de proposer un ensemble d'hypothèses ou d'invariants à partir de données expérimentales. Comme nous l'avons vu, les expérimentations font l'objet d'un protocole cherchant à standardiser les situations et, ainsi, à limiter l'influence des paramètres qui ne sont pas étudiés. Par exemple, Plusieurs auteurs [Saunders 53, Olney 96] ont émis l'hypothèse que les oscillations verticales du bassin lors de la marche des hémiplegiques permettent d'expliquer le surcoût énergétique généralement observé. Un autre auteur [Mattson 90] a montré qu'un défaut de flexion du genou dû au handicap entraîne lui aussi une augmentation du coût énergétique. Ces résultats peuvent amener à supposer que le défaut de flexion du genou entraîne justement des oscillations verticales du bassin. Un modèle numérique de squelette et de locomotion peut aller au-delà de ces observations pour vérifier cette hypothèse. Le défaut de flexion peut être modélisé par une contrainte sur la valeur maximale que peut prendre la flexion du genou. C'est la phase de modélisation.

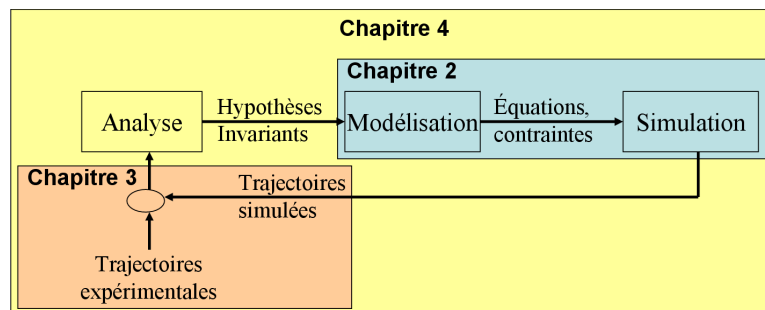


FIG. 2.1 – Synopsis montrant l'interaction entre analyse et synthèse du mouvement.

La simulation peut alors montrer qu'une augmentation des oscillations verticales du bassin est bien observée sur le modèle si le défaut de flexion du genou est artificiellement augmenté. L'intérêt de cette simulation est de disposer d'une relation précise entre plusieurs paramètres. Il est ainsi possible de chiffrer précisément le lien entre une valeur de limite angulaire et une amplitude d'oscillation verticale, dans le cadre du modèle. Cependant, si le modèle est faux ou imprécis, les résultats obtenus ne sont d'aucun intérêt. Il est alors nécessaire de confronter les données simulées avec des données expérimentales pour s'assurer que le modèle retranscrit bien la réalité. Ce couplage entre l'analyse et la synthèse de mouvements a été particulièrement utilisé par F. Yeadon pour les mouvements aériens de gymnastes [Yeadon 90]. Un grand nombre de travaux ont été proposés avec la même philosophie dans le domaine des neurosciences et de la cybernétique pour vérifier, par exemple, que la trajectoire simulée d'un bras en 2D qui minimise l'énergie métabolique est celle qui est la plus proche de mesures expérimentales [Alexander 97]. Plusieurs

auteurs [Delp 90, Nakamura 05] ont aussi adopté ce type d'approche en modélisant à la fois le squelette et les muscles. Grâce à cette méthode, S. Delp [Delp 90] tente de prédire quel acte chirurgical est le plus approprié à une pathologie et à un sujet donné pour améliorer sa gestuelle. Toutefois, les techniques généralement mises en œuvre se fondent sur des simulateurs mécaniques qui prennent les forces musculaires en entrée pour obtenir un mouvement. Ceci oblige à modéliser finement le squelette avec les muscles et à recourir à des temps de calculs importants pour résoudre les équations différentielles de la mécanique. De plus, un grand nombre de paramètres mécaniques sont inconnus ou imprécis, et aucune validation n'est réellement possible puisqu'il faudrait être capable de mesurer les forces musculaires de tous les muscles mis en jeu. Je propose, pour ma part, d'utiliser des approches inspirées de celles proposées dans le domaine de l'animation par ordinateur, qui peuvent s'adapter à des modèles plus ou moins complets du squelette et du mouvement. L'objectif principal est de fournir une méthodologie et des outils nouveaux d'analyse/synthèse du mouvement.

Ce document présente trois grandes contributions s'inscrivant dans ce schéma. La première (chapitre 3) concerne le développement d'un processus de simulation de mouvements permettant d'intégrer et de tester rapidement des règles issues d'expérimentations. Cette contribution s'inscrit principalement dans les blocs "Modélisation" et "Simulation" de la figure 2.1. Dans le chapitre 4, nous proposons un protocole permettant de tester en réalité virtuelle le comportement de sujets devant interagir avec des entités autonomes animées avec notre système. Ce chapitre s'intéresse donc à la boucle qui permet de valider les sorties de la simulation (cf. figure 2.1). Enfin, le chapitre 5 s'intéresse à proposer un modèle d'animation, totalement inscrit dans le schéma présenté en figure 2.1, dont le but est de prédire des locomotions probables pour diverses formes de bipèdes. L'une des applications de cette troisième contribution est la génération de trajectoires locomotrices plausibles pour des espèces éteintes (comme "Lucy", A.L. 288-1, *Australopithecus afarensis*) étant donné un ensemble d'hypothèses provenant des domaines de la paléanthropologie, des neurosciences et de la biomécanique.

Chapitre 3

La simulation au service de la compréhension du mouvement humain

Comme nous l'avons vu en préambule, les analyses pratiquées en biomécanique ou en neurosciences permettent de proposer un ensemble d'hypothèses ou d'invariants sur le contrôle moteur à partir de données expérimentales. C'est ce qui constitue le premier bloc de la figure 2.1. Nous avons montré l'intérêt d'utiliser des modèles numériques et des simulateurs capables de tester l'influence de ces hypothèses sur un mouvement calculé. Il est ainsi possible de vérifier si les hypothèses engendrent un mouvement comparable à ceux provenant de données expérimentales.

Ce chapitre a pour but de proposer une méthode de simulation de mouvements qui puisse répondre à ce type de problématique. Ce chapitre traite donc des blocs "modélisation" et "simulation" de la figure 2.1. La méthode idéale doit donc fournir un ensemble de fonctionnalités capables de piloter le corps humain en laissant la possibilité de tester des hypothèses à différents niveaux du processus de génération du mouvement. Si ces hypothèses s'appliquent à un niveau donné du contrôle moteur (cf. figure 1.1), la méthode doit être capable de gérer les autres niveaux (inférieurs ou supérieurs) allant jusqu'au calcul du mouvement à proprement parler. Prenons l'exemple présenté en préambule : tester l'influence d'une immobilisation du genou sur le coût énergétique de la marche. Dans ce cas, le défaut de flexion du genou pourrait être modélisé comme une valeur maximale de vitesse de rotation et la méthode doit en tenir compte dans la simulation du mouvement résultant, sans avoir à redéfinir totalement le mode de calcul. Ceci implique que la méthode mise en œuvre soit capable de proposer des mouvements réalistes dans la plupart des cas et, donc, d'intégrer à l'avance un certain nombre d'hypothèses. Il suffit alors d'ajouter ou de remplacer une hypothèse pour répondre à cette problématique.

Nous souhaitons, de plus, que cette méthode soit capable de calculer très rapidement des mouvements afin d'intégrer les personnages synthétiques dans des environnements interactifs. En effet, dans certaines applications, on peut souhaiter interagir avec les person-

nages et attendre donc une réponse rapide à une action d'un utilisateur. C'est le cas en réalité virtuelle où les hypothèses à tester interviennent à des niveaux sociaux ou rationnels qui impliquent une interaction entre plusieurs personnes. On peut aussi souhaiter tester des hypothèses sur la manière dont les personnes s'adaptent à des situations pouvant évoluer de manière imprévisible. C'est le cas lors de la simulation de foules où on ne connaît pas à l'avance le comportement des autres personnages. On peut même envisager de coupler à notre système un modèle de perception-décision-action, appelé alors modèle comportemental (cf. l'HDR de Stéphane Donikian [Donikian 04] pour un point récent sur ce type de modèles) qui permette au personnage de prendre de l'information dans son environnement et décider des nouvelles actions à effectuer en conséquence. La méthode idéale doit donc être capable de réagir rapidement aux décisions prises par ce modèle.

La section suivante présente un état de l'art des différentes techniques de génération de mouvements afin de déterminer leur adéquation avec cette problématique.

3.1 Problématique

Simuler le mouvement d'un personnage synthétique implique de résoudre un grand nombre de problèmes, même si le modèle d'humain virtuel est généralement beaucoup plus simple que l'original. Le premier problème à résoudre est la modélisation du système osseux. Dans tous les domaines, le squelette humain est généralement modélisé par un ensemble de solides rigides articulés entre eux grâce à des articulations parfaites (comportant de 1 rotation à 3 rotations et 3 translations), comme l'indiquent par exemple Watt et Watt [Watt 92] en informatique graphique ou la société de biomécanique [Wu 05, Wu 02].

Le squelette est alors décrit comme une hiérarchie de corps rigides (ou segments) dont la racine est choisie généralement sur le bassin. Ainsi, le mouvement d'un segment dépend de l'articulation à laquelle il est connecté et aux transformations géométriques que subissent ses parents dans la hiérarchie. Par exemple, le mouvement de la main dépend des angles appliqués au poignet ainsi que du mouvement de l'avant-bras dans l'espace. L'avantage de cette description hiérarchique est que l'on peut décrire une posture par un vecteur d'état des différents degrés de liberté pour toutes les articulations. Si chaque articulation i se caractérise par trois rotations possibles $q_i(t)$, la posture peut se décrire par le vecteur $\theta(t) = \{P(t), \Theta(t), \{q_i(t)\}_{i=1\dots n}\}$, où $P(t)$ et $\Theta(t)$ sont respectivement la position et l'orientation globale du personnage. n est le nombre d'articulations considérées.

Un mouvement est donc une succession de postures $\theta(t)$ qu'il faut calculer à une fréquence donnée. Etant donné $\theta(t)$ à chaque instant, il est possible de calculer la trajectoire d'un point sur le squelette $X(t)$ par une fonction dite de cinématique directe $f : X(t) = f(\theta(t))$. f est directement liée à la hiérarchie décrivant le squelette du personnage [Watt 92].

Une fois le squelette et le mouvement modélisés de la sorte, un deuxième problème consiste à contrôler les trajectoires $\theta(t)$ afin d'effectuer des tâches plus ou moins complexes. Par exemple, quelles valeurs successives doit-on appliquer à θ pour que le mouvement résultant ressemble à une locomotion naturelle ? Un grand nombre de ces tâches peuvent se caractériser par des buts (ou contraintes) à atteindre [Badler 91]. Ainsi, on peut imposer des contraintes au niveau cinématique afin d'amener une partie du squelette à passer par une position donnée X_c à un instant donné t_c : $X(t_c) = X_c$. Les modèles qui

utilisent uniquement ce type de contraintes, sans faire appel à des mouvements capturés, sont appelés "modèles cinématiques". Cependant, le corps humain dispose en général de bien plus de possibilités de mouvements (ou degrés de liberté) que de contraintes cinématiques à vérifier. Le problème est donc sous contraint et entraîne une infinité de postures (et donc de vecteurs $\theta(t)$) possibles. Inverser f conduit donc à un espace de solutions dans lequel il faut sélectionner celle qu'un être humain aurait naturellement choisie. En biomécanique, ceci est connu sous le nom de problème de Bernstein [Bernstein 67, Turvey 90]. La recherche de la fonction inverse de f est appelée "cinématique inverse". Le centre de masse est un point particulier associé au personnage. Il existe donc aussi une fonction f permettant de calculer la position du centre de masse en fonction de la posture $\theta(t)$ et des masses associées à chaque segment. Le centre de masse est un paramètre déterminant dans le contrôle de l'équilibre et il est donc nécessaire de contraindre sa position en inversant la fonction f . Dans ce cas, on parle plutôt de "cinétique inverse" [Boulic 96]. Là encore, il existe un grand nombre de postures possibles assurant que le centre de masse soit placé sur la contrainte.

Parmi l'ensemble des postures possibles, il faut sélectionner celle qui tient compte de tous les phénomènes rentrant en jeu dans la génération d'un mouvement naturel. Les lois de la mécanique comptent parmi ces phénomènes. Elles font intervenir les masses, les inerties, les forces et les accélérations. Elles permettent de réduire l'espace des postures possibles. Les modèles dits dynamiques cherchent donc à caractériser le sous-ensemble de postures qui vérifient les principales lois de la mécanique. Par exemple, seul un sous-ensemble des postures assure que le centre de masse suive une trajectoire uniformément accélérée pendant un vol. Il reste toutefois encore plusieurs solutions. Il est alors possible de définir de nouvelles contraintes qui modélisent, par exemple, les lois issues des sciences expérimentales. C'est le cas de la minimisation d'énergie qui semble être vérifiée pour un grand nombre de gestes naturels, dont la locomotion bipède [Alexander 97, Alexander 04]. C'est à ce niveau que l'on peut tester plusieurs hypothèses de ce type.

Cependant, la majorité des lois issues des sciences expérimentales proviennent de données moyennes et n'expliquent peut-être pas toujours les choix effectués par certains individus. Ces choix peuvent être guidés par une multitude de raisons (sociologiques, psychologiques...) qui conduisent à de légères adaptations des postures. Dans la suite de ce document, nous parlerons de "styles" pour caractériser ces adaptations. Johansson [Johansson 73] a montré que quelques points animés sur un écran permettaient de reconnaître la locomotion d'un homme, d'une femme, voire même d'une personne familière. Ces variantes de locomotion respectent toutes les mêmes contraintes cinématiques et dynamiques mais démontrent qu'il existe encore d'autres contraintes à prendre en compte pour caractériser complètement le mouvement naturel.

Au sein même du niveau biomécanique de la figure 1.1, il y a donc plusieurs types de contraintes qui limitent chacune les choix possibles pour calculer un mouvement naturel. Plutôt que de tenter d'identifier de manière exhaustive toutes les contraintes à respecter, la communauté d'informatique graphique a proposé des méthodes de génération de mouvements se basant sur des bases de données capturées. Avec la multiplication des systèmes de capture de mouvements depuis la fin des années 1990, un grand nombre d'approches récentes se basent sur l'utilisation directe de trajectoires obtenues expérimentalement. Il existe un grand nombre de systèmes de capture de mouvements.

Les systèmes commerciaux les plus répandus peuvent se diviser en deux familles. Les systèmes utilisant des capteurs positionnés sur le corps enregistrent généralement de manière active leur position et leur orientation dans l'espace. Ces données exprimées dans le repère global peuvent ensuite être rapidement traduites en séquences $\{\theta(t)\}$ [Bodenheimer 97, Molet 99, O'Brien 00]. Les autres systèmes se basent sur des marqueurs passifs eux aussi positionnés sur le corps mais seule leur position est prélevée par un capteur. Les systèmes les plus courants utilisent des marqueurs réfléchissants et des caméras équipées de stroboscopes infrarouges. Ils fournissent donc des positions $X(t)$ dans l'espace à partir desquelles il faut calculer les trajectoires articulaires $\theta(t)$ correspondantes. Ceci se rapproche d'un problème de type cinématique inverse [Herda 00, Herda 01] mis à part que, cette fois, le système est surcontraint : le vecteur $X(t)$ est plus grand que $\theta(t)$. Cependant, certains marqueurs peuvent être cachés lors de la mesure (par le corps du sujet ou simplement ne pas se trouver dans le champs des caméras), ce qui conduit à ce que l'on appelle des occultations et, donc, des données $X(t)$ incomplètes.

Pour générer un mouvement avec un style donné (par exemple, féminin, en colère ou fatigué), plusieurs approches proposent d'adapter un ou plusieurs fichiers ayant été enregistrés avec ce style. On peut identifier deux principales familles de méthodes :

- naviguer dans une grande base de données pour extraire une combinaison de plusieurs mouvements répondant au problème,
- ou modifier un unique mouvement de la base de données pour l'adapter à des contraintes cinématiques et dynamiques tout en tentant de préserver le style initialement contenu dans le fichier.

Nous détaillons maintenant ces différentes approches afin de déterminer comment répondre à la problématique posée dans ce chapitre : proposer une méthode rapide (compatible avec les applications interactives) permettant de tester plusieurs types d'hypothèses (biomécaniques, neurophysiologiques ou comportementales) sur le contrôle moteur humain. Ces approches peuvent s'organiser en fonction des contraintes qu'elles permettent de prendre en compte, comme le montre la figure 3.1.

Sans mouvement capturé		Avec mouvements capturés
Contraintes cinématiques	Modèles cinématiques Planification	Mélange et adaptation de mouvements
Contraintes dynamiques	Modèles dynamiques	Adaptation de mouvements + dynamique
Style	Application de styles	Mélange et adaptation de mouvements

FIG. 3.1 – Proposition de classification des méthodes de génération de mouvements en fonction des contraintes qu'elles permettent de prendre en compte.

3.1.1 Les modèles cinématiques

Ces modèles sont fondés sur une représentation algorithmique des mouvements. Pour cela, ils modélisent par exemple des trajectoires articulaires types, parfois issues de données expérimentales mais plus généralement de données moyennes publiées en biomécanique [Zeltzer 82, Bruderlin 89, Boulic 90, Multon 98, Sun 01]. Par exemple, les trajectoires articulaires sont modélisées par des courbes paramétriques [Zeltzer 82] passant par des valeurs limites (positions clés) issues de publications en biomécanique [Alexander 84]. Cependant, appliquer les angles moyens d'humains évoluant à une vitesse donnée à une structure poly-articulée devant répondre à d'autres conditions (de vitesse, de longueur des pas, de forme de terrain et de virage) conduit inévitablement à devoir corriger les trajectoires. L'une des corrections les plus répandues implique la cinématique inverse pour assurer que les pieds restent bien positionnés sur le sol sans glissement ou suivent un sol non plat [Girard 85, Boulic 92, Cozot 99].

Ces modèles peuvent être enrichis avec des opérateurs qui modifient les trajectoires afin de tenir compte des émotions du personnage, principalement pour des entités communicantes [Juillard 99, Chi 00, Pelachaud 02].

Malgré le volume de connaissances acquises sur la forme caractéristique de la locomotion humaine, simuler ce geste de manière réaliste sur des humanoïdes synthétiques reste un problème si on veut traiter la multitude des situations possibles. Si cette approche se prête bien à la locomotion pour laquelle on dispose d'une vaste base de connaissances, il est difficile de définir des modèles cinématiques pour des gestes quelconques pour lesquels on ne dispose pas à l'avance d'analyses complètes. Enfin, ces modèles ne prennent pas réellement en compte la dynamique ce qui peut conduire à des mouvements irréalistes du point de vue physique.

3.1.2 La planification

Plutôt que de partir de connaissances complètes sur le mouvement, les approches de planification génèrent des successions de postures afin d'amener le personnage dans une configuration donnée. Cela consiste donc à chercher un chemin menant d'une configuration initiale (position et orientation) à une configuration finale d'un système en déplacement. Cette approche a été principalement utilisée en robotique pour piloter un robot dans un environnement contraint (comportant des obstacles). L'espace des configurations comprend un sous-ensemble des degrés de liberté d'un système. Par exemple, pour guider un personnage à travers un environnement, on peut contrôler sa position et son orientation. L'espace des configurations du personnage est alors limité à 3 degrés de liberté : position 2D sur le sol et orientation dans ce plan. Ainsi, un point de cet espace est représenté par ces trois valeurs. Planifier les déplacements d'une configuration d'origine vers une configuration finale revient donc à chercher une courbe reliant deux points de cet espace de configuration [Latombe 91, Kavraki 96, Laumond 98, Choi 03]. Ces approches ont été principalement utilisées pour des systèmes naviguants pour lesquels on doit planifier les déplacements (limités à la position et à l'orientation générales du système). Ceci a été étendu à la planification de tâches de préhension dans des environnements complexes [Arechavaleta 04] qui peut s'appuyer sur les degrés de liberté complets d'un système.

Récemment, ces approches ont été couplées à des algorithmes de mélange de mouvements [Pettre 03] et de cinématique inverse [Esteves 06] pour piloter un humanoïde dans des environnements complexes. Le déplacement et de l'orientation du personnage sont calculés par planification alors que les trajectoires articulaires des membres supérieurs (resp. inférieurs) sont obtenues par les autres approches. Par exemple, les bras sont contrôlés par cinématique inverse alors que le mouvement des jambes est obtenu en mélangeant plusieurs locomotions d'une base de données (cf. section 3.1.4).

Même si les approches à base de planification n'ont pas encore été utilisées pour tester des hypothèses locomotrices, on pourrait imaginer concevoir un système dans lequel la recherche du chemin entre les configurations initiales et finales d'un système complexe s'effectuerait à l'aide d'hypothèses issues des sciences expérimentales (biomécanique et neurosciences). Il faudrait toutefois réussir à tenir compte du temps afin de prendre en compte des hypothèses fondées sur les vitesses ou les accélérations, ce qui reste un problème difficile pour ces approches de planification.

3.1.3 Les modèles dynamiques

La prise en compte des accélérations, des forces et des inerties mises en jeu lors d'un mouvement s'effectue grâce à des modèles dynamiques. Ces modèles se fondent sur une description du squelette d'un point de vue mécanique conduisant à un système d'équations différentielles non linéaires du second ordre. Ces équations sont obtenues à partir des formalismes généraux de la mécanique comme le formalisme d'Euler ou de Lagrange. Quel que soit le formalisme, le résultat est une équation différentielle reliant les dérivées successives des degrés de liberté aux forces et moments mis en jeu. Etant donné des forces et moments externes ainsi que les couples articulaires appliqués à chaque liaison, ces équations fournissent les dérivées des différents degrés de liberté du système. Au sein du projet SIAMES plusieurs travaux ont été menés pour générer automatiquement ces équations à partir d'une description du système mécanique [Arnaldi 89, Dumont 90] et plusieurs méthodes de résolution numériques ont été proposées. Dans le commerce, on trouve maintenant plusieurs bibliothèques et outils logiciels pour effectuer ce type d'opération.

Cependant, pour générer un mouvement, il n'est pas aisé ni intuitif de définir l'évolution des couples articulaires nécessaires à la réalisation d'une tâche donnée, généralement exprimée par des contraintes cinématiques (vitesse de déplacement, position d'un objet à saisir. . .) Il est alors nécessaire de synthétiser un contrôleur qui puisse effectuer cette opération. L'approche la plus largement utilisée consiste à définir un système en boucle fermé, c'est à dire qui cherche à minimiser la distance entre l'état courant du système et l'état désiré en faisant varier les couples articulaires (cf. figure 3.2).

Le principal problème consiste alors à synthétiser un contrôleur capable de vérifier les contraintes tout en produisant un mouvement naturel. L'une des méthodes consiste à définir des graphes de postures clés [Hodgins 95, Hodgins 96, Brogan 98, Yang 04]. Ces graphes indiquent la succession de postures clés à respecter dans un mouvement et à utiliser des contrôleurs en boucle fermé pour faire tendre l'état du système vers celui représentant la posture suivante. Cependant, les gains qui paramètrent les contrôleurs en boucle fermée restent difficiles à obtenir même s'il existe des solutions pour tenir compte, par exemple, de la morphologie du personnage (changement de dimension et de masse des

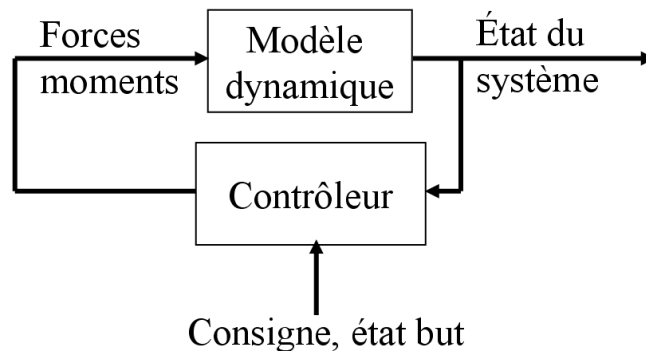


FIG. 3.2 – Organisation générale d'un système dynamique en boucle fermée utilisant une description mécanique du squelette et un contrôleur pour minimiser la distance entre l'état courant et l'état désiré.

segments) [Hodgins 97b]. Ces modèles posent aussi le problème de l'extraction de postures clés pertinentes (en nombre et en qualité). Ces approches ne permettent donc pas d'aider à identifier les fondamentaux du mouvement naturel mais essaient de reproduire des trajectoires connues.

A la frontière entre les disciplines, on trouve les méthodes dites de "robotique évolutionniste" [Sellers 05] ou, plus généralement, celles utilisant des réseaux de neurones [Bendahan 04]. Elles cherchent à synthétiser un contrôleur en faisant muter un réseau de neurones dans le but de maximiser un score (avancer le plus loin possible pour une locomotion, par exemple). Même si ces contrôleurs permettent d'obtenir un système capable de s'adapter relativement bien à de nombreuses conditions, rien n'assure que le mouvement produit soit naturel. De plus, les réseaux de neurones sont des boîtes noires difficiles à exploiter pour rechercher des fondamentaux du mouvement humain. De plus, les temps de calcul nécessaires pour converger vers un contrôleur viable sont très importants.

Pour conclure avec les modèles dynamiques, on peut retenir que, bien qu'ils assurent un respect de la dynamique, il reste très difficile de produire des gestes naturels et les résultats sont souvent visuellement "robotiques". De plus, les temps de calcul mis en jeu pour le contrôleur et pour résoudre les équations différentielles restent incompatibles avec l'animation interactive de plusieurs personnages. Cependant, pour des applications ne nécessitant pas d'interactivité, ils offrent des outils intéressants de tests. En effet, les contrôleurs peuvent tenir compte d'un ensemble d'hypothèses à tester.

3.1.4 Le mélange de mouvements

Les approches précédentes n'utilisent pas directement des mouvements capturés (cf. figure 3.1) et nécessiteraient donc, théoriquement, de formaliser toutes les lois permettant de générer des mouvements naturels. Les approches s'appuyant sur une base de données de mouvements capturés supposent qu'une déformation de trajectoires réelles peut répondre

au problème sans explicitement modéliser ces lois.

Dans cette philosophie, on trouve les méthodes de mélange de mouvements. Le principe est de supposer que la composition de plusieurs mouvements naturels peut donner des résultats réalistes. Ainsi, les différents travaux dans ce domaine cherchent à définir des fonctions de composition qui vérifient au mieux cette hypothèse. Les premiers opérateurs de composition qui ont été proposés étaient des interpolateurs linéaires dans une base de données de trajectoires capturées [Guo 96, Ashraf 01, Pettre 03]. Ainsi, en effectuant une somme pondérée des degrés de liberté de deux mouvements de marche, on obtient un mouvement "compromis". Ces méthodes d'interpolation s'appuient sur des bases de données relativement légères, comportant quelques mouvements différents. Cependant, l'interpolation linéaire n'est pas toujours valide. Du point de vue physique, une étude récente [Safonova 05] a montré les lois mécaniques que les interpolations de mouvements devaient prendre en compte.

Pour aller au-delà de l'interpolation linéaire, des travaux récents proposent d'organiser une vaste base de données de mouvements afin de couvrir un large ensemble de contraintes. Ainsi, si on souhaite faire saisir un objet à un personnage de synthèse, on peut disposer d'une énorme base de données de mouvements de préhension et chercher celui qui correspond au mieux à la position de l'objet à saisir. Pronost et coll. [Pronost 06] ont proposé d'indexer une base de données de mouvements en fonction des paramètres anatomiques pour résoudre des problèmes d'adaptation à la morphologie. Il est ainsi possible d'interpoler parmi les trajectoires présentes dans la base de données en fonction des paramètres anatomiques d'une nouvelle créature à simuler.

En poussant plus loin cette approche, plutôt que de considérer un mouvement dans sa globalité, on peut avoir le même type de raisonnement posture après posture. Il est ainsi possible que la posture courante appartienne à un mouvement m_1 alors que la posture finale de préhension soit plus proche de celle du mouvement m_2 . On est alors tenté de chercher comment passer du début de m_1 à la fin de m_2 . La solution proposée consiste à organiser la base de données en graphes de mouvements où chaque nœud correspond à une posture et chaque arc est une transition possible entre deux postures [Kovar 02, Lee 02]. Au sein d'un même mouvement, deux postures successives sont évidemment reliées par un arc mais on peut ajouter de nouveaux arcs qui font le lien entre deux postures appartenant à des mouvements différents. Ces nouveaux arcs sont créés lorsqu'une fonction de distance [Wang 03a] entre deux nœuds retourne une valeur inférieure à un seuil donné.

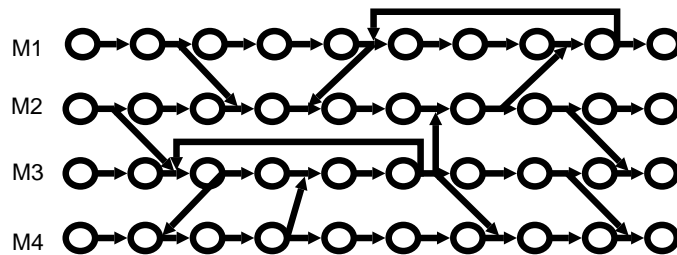


FIG. 3.3 – Graphe de mouvement obtenu à partir de 4 trajectoires (M_1 à M_4). Les cercles représentent les postures et les arcs les transitions possibles entre deux d'entre elles.

Grâce à cette approche, il est ainsi possible de guider un boxeur pour qu'il atteigne des cibles indiquées de manière interactive par un utilisateur [Lee 04]. Dans cet exemple, le graphe de mouvements sert à trouver un chemin parmi un ensemble de trajectoires de frappes et de déplacements pour amener la posture actuelle vers un nœud où le point d'impact est proche de la cible désignée. Le principal coût de calcul de cette méthode, en dehors d'une phase évidemment longue de précalcul des arcs possibles, concerne la recherche de chemin dans le graphe. Ce temps peut être très long si la base de données comporte un grand nombre de nœuds. Il est possible de regrouper les arcs et les nœuds qui sont proches pour réduire ce nombre et améliorer les performances [Gleicher 03].

Ces méthodes sont principalement dédiées à l'utilisation de bases de données de gestes pour résoudre des tâches plus ou moins complexes. On suppose alors que le geste est réaliste puisqu'il résulte d'une combinaison de mouvements capturés, sans chercher à comprendre ce qui rend le mouvement naturel. Le seul paramètre qu'il peut être intéressant de faire varier est la fonction de distance utilisée pour relier deux postures.

3.1.5 L'édition de mouvements capturés

Contrairement à l'approche précédente, le principe ici est de modifier un unique mouvement afin de résoudre des contraintes cinématiques ou dynamiques différentes. Par exemple, comment modifier un mouvement de préhension pour saisir un objet qui ne se trouve pas à la position initialement contenue dans les trajectoires capturées ? Les premières approches consistaient à poser des contraintes spatio-temporelles (position à un instant précis) puis à employer des méthodes coûteuses d'optimisation non-linéaire pour trouver une solution [Witkin 88, Cohen 92, Ngo 93, Liu 94, Witkin 95, Fang 03]. Pour diminuer l'espace de recherche de l'optimisation, les trajectoires articulaires étaient représentées par des fonctions paramétriques. Seuls les paramètres étaient alors utilisés pour l'optimisation. Grâce à ces approches, il est aussi possible de tenir compte des couples articulaires mis en jeu en intégrant ces informations dans la fonction à optimiser. Cependant, les temps de calcul de ce type d'approche ne sont absolument pas compatibles avec des applications interactives.

Une adaptation de ces approches appelée "ajout de cartes de déplacements" [Gleicher 97, Gleicher 98a, Gleicher 98b, Lee 99, Shin 01, LeCallennec 04] permet d'atteindre des temps de calcul nettement plus courts. Le principe est de chercher à ajouter une fonction continue du temps $D(t)$ à chaque trajectoire articulaire $\theta(t)$ afin de résoudre les différentes contraintes : chercher $D(t)$ tel que $\theta(t) + D(t)$ résolve toutes les contraintes. Un processus itératif est alors mis en place. Tout d'abord, le système résout les contraintes cinématiques uniquement aux instants auxquels elles sont spécifiées. La trajectoire discontinue ainsi obtenue est filtrée ce qui conduit à un non-respect des contraintes. Le processus est répété jusqu'à convergence.

Cependant, ces méthodes se limitent généralement à des aspects cinématiques même si quelques propositions ont été faites pour tenir compte partiellement de la dynamique, particulièrement en cas de chocs [Zordan 99, Pollard 00, Zordan 05, Arikan 05, Komura 05]. C'est pourquoi on trouve une référence à ces approches dans la ligne "contraintes dynamiques" de la figure 3.1. Dans ces approches, un modèle mécanique simplifié du squelette est utilisé pour simuler le comportement passif du personnage face à ce choc. Alors que la simulation mécanique a lieu, le système cherche dans une base de données quel mouve-

ment peut le mieux lui succéder, en fonction de sa posture, du vecteur vitesse et de l'impact subi.

Une autre approche permettant de tenir compte de lois mécaniques consiste à travailler sur les forces externes du mouvement d'origine par dynamique inverse [Pollard 00]. Le système mécanique ramené au centre de masse permet de simplifier largement les équations de la mécanique et, plus spécifiquement, le calcul de la dynamique inverse. Les forces obtenues au cours du temps sont optimisées pour répondre aux contraintes tout en vérifiant, par exemple, que la gravité est respectée en phase aérienne. Cependant, le passage au calcul des autres degrés de liberté implique une méthode d'optimisation qui dégrade les performances de temps de calcul.

Quelles que soient les méthodes utilisées en édition de mouvements, plusieurs types d'hypothèses sur le contrôle moteur peuvent être intégrées dans les fonctions à minimiser. Il est alors possible de tester leur influence sur le mouvement calculé. Toutefois, les temps de calcul qui en résultent sont incompatibles avec les applications interactives. Il serait donc nécessaire de trouver une méthode qui offre des temps de calcul plus faibles tout en conservant cette philosophie.

3.1.6 L'extraction de style

Pour ajouter des contraintes sur le style dans des approches utilisant des bases de données de mouvements, on peut distinguer deux principales méthodes. Dans ces deux méthodes, le problème posé est de séparer les éléments liés au style individuel ou aux émotions de la tâche elle-même (qui serait effectuée dans un style que l'on pourrait qualifier de neutre). L'objectif est de générer de nouveaux mouvements neutres répondant à des contraintes cinématiques et dynamiques, puis d'y ajouter des effets stylistiques. La première méthode consiste à utiliser les résultats publiés en psychologie et en neurosciences et à définir des opérateurs de déformation en conséquence [Chi 00]. Cependant, les connaissances dont on dispose sont généralement spécifiques aux gestes de communication et on peut s'interroger sur leur application dans un cadre plus général.

La deuxième méthode consiste à mener une analyse statistique afin d'identifier les effets de style inclus dans les mouvements d'une vaste base de données. Cette méthode fait généralement appel à l'analyse en composantes principales (ACP) ou d'autres méthodes statistiques similaires pour chercher un sous-ensemble de variables représentant le mieux les mouvements regroupés dans la base de données [Cao 03, Glardon 04, Hsu 05, Liu 05]. L'ACP permet d'identifier une représentation compacte (principaux vecteurs propres de la matrice contenant tous les mouvements) des plusieurs gestes supposés similaires mais pouvant avoir des styles différents. La représentation compacte commune à tous ces mouvements est supposée fournir le style neutre [Skocaj 02, Forbes 05]. Les principales limites de ces approches sont de se limiter à des relations linéaires entre degrés de liberté et de produire des variables qu'il est très difficile de contrôler. En effet, ces variables n'ont plus de signification réelle et sont donc moins intuitives que les degrés de liberté eux-mêmes. Cette méthode est adaptable à un grand nombre de mouvements et de styles à condition de disposer de bases de données volumineuses. Elles font cependant l'hypothèse que le style peut s'extraire en appliquant des transformations linéaires sur les trajectoires, ce qui ne répond pas, *a priori*, à l'ensemble des cas possibles. Or, la colère peut provoquer des

répétitions qui ne sont pas modélisables par ce type d'approche.

3.1.7 Bilan

Comme nous venons de le voir, deux grandes approches s'opposent en simulation de mouvements : utiliser directement ou non des données capturées. Avec la première approche, le mouvement simulé est uniquement lié à la qualité des modèles qui prennent en compte des contraintes cinématiques, dynamiques ou de style. Pour les modèles cinématiques, l'absence de dynamique peut conduire à des mouvements irréalisables selon les lois fondamentales de la mécanique. Pour les modèles dynamiques, les mouvements générés manquent généralement de naturel. En introduction, nous avons vu l'intérêt de travailler sur un niveau de contrôle du mouvement humain en supposant que les autres niveaux sont capables de s'adapter [Berthoz 03]. Les modèles proposés en simulation (que ce soit cinématique, dynamique ou prenant en compte le style) se fondent sur une hypothèse analogue. Ainsi, les modèles cinématiques supposent que les contraintes dynamiques ne sont pas violées. De même, les modèles dynamiques supposent que le style n'est pas remis en cause par les contrôleurs. Or, avec les approches n'utilisant pas directement de données capturées, cette hypothèse est difficilement vérifiable car aucun autre élément ne vient compléter le modèle proposé. Par exemple, un modèle dynamique qui génère directement des séquences de postures ne dispose d'aucun processus pour tenir compte du style.

Avec la deuxième approche, les mouvements capturés intègrent de manière intrinsèque tous les niveaux de contrôle puisqu'ils ont été effectués par un sujet réel. Ainsi, adapter une séquence de postures afin de résoudre des contraintes cinématiques peut conduire à des mouvements conservant le style initial. Même si ce n'est pas garanti pour de grandes adaptations, cette hypothèse semble plus raisonnable qu'en ne partant d'aucune donnée réelle. Le cas est encore plus évident pour les graphes de mouvements qui utilisent des données capturées, sans adaptation. Dans un objectif de test d'hypothèses isolées sur le contrôle moteur, ces approches semblent donc plus prometteuses que celles n'intégrant aucun mouvement capturé. De plus, ces approches rejoignent l'un des problèmes classiquement rencontré dans les sciences expérimentales : comment extraire de l'information et naviguer au sein d'une base de données expérimentale de mouvements ?

Les graphes de mouvements peuvent être, par exemple, utiles pour tester des hypothèses sur les enchaînements possibles entre postures. Indirectement, cela pose le problème fondamental de la définition d'une métrique capable de représenter une distance entre mouvements. C'est un problème difficile qui n'a pas encore trouvé de solution dans les diverses disciplines. Les graphes de mouvements se prêtent bien à l'expérimentation de différentes distances. Ainsi, étant donné un problème à résoudre (suivre une cible dans l'espace, aller d'un point à un autre...) et une base de données de mouvements (dont aucun ne permet de résoudre directement le problème), il serait intéressant de comparer les résultats obtenus avec des gestes capturés pour vérifier si la métrique est pertinente.

Cependant, pour un grand nombre d'autres hypothèses (comme la minimisation d'énergie [Alexander 97, Alexander 04] ou l'existence de lois de coordination entre les articulations [Bianchi 98]), il est nécessaire d'aller au-delà d'une composition de postures. Les méthodes d'adaptation de mouvements se prêtent donc mieux à ce type d'hypothèses. Elles permettent en effet de déformer des postures en prenant en compte ces hypothèses et de

vérifier si le résultat est réaliste.

Dans le préambule, nous avons posé une difficulté supplémentaire concernant les temps de calcul. Les méthodes proposées doivent être adaptées aux environnements interactifs. Cependant, la majorité des méthodes d'adaptation se fondent sur une connaissance globale du mouvement qui n'est pas disponible en environnement interactif. La section suivante présente une proposition de méthode de simulation qui résout ce problème. Ces travaux ont été initiés pendant ma thèse mais ont ensuite été repris par plusieurs doctorants pendant ma carrière de Maître de Conférences.

3.2 Proposition d'un module de simulation de mouvements

Stéphane Ménardais, pendant sa thèse [Ménardais 03] (de 2000 à 2003) co-encadrée par Bruno Arnaldi et moi-même, a proposé une architecture logicielle permettant de corriger, de combiner et d'adapter des mouvements capturés. Nous avons aussi introduit une nouvelle représentation du squelette et des mouvements sur laquelle repose toutes les méthodes présentées dans cette section. Richard Kulpa [Kulpa 05a] (jusqu'en novembre 2005) a poursuivi ces travaux pour y inclure de nouvelles fonctionnalités d'adaptation à des contraintes cinématiques, cinétiques et dynamiques. Ceci a conduit à une méthode de simulation de mouvements que nous avons appelée *MKM* pour "Manageable Kinematic Motion".

3.2.1 Aperçu global de *MKM*

MKM est organisé selon l'architecture présentée dans la figure 3.4. L'un des points majeurs de notre approche est l'utilisation d'une représentation indépendante de la morphologie pour mener à bien la quasi-totalité des opérations. Ainsi, quel que soit le sujet ayant effectué les captures de mouvements et le personnage à animer, on s'abstrait des problèmes d'adaptation impliquant des temps importants de calcul. Cette représentation est composée :

- des **membres** qui sont des chaînes cinématiques à deux segments représentant soit les bras, soit les jambes. Ces membres sont représentés par des liens de longueur variable reliant l'origine à l'extrémité associés à l'angle du demi-plan devant contenir l'articulation intermédiaire (coude ou genou). Le lien est de longueur variable puisqu'il dépend de l'angle de flexion du coude. Pour éliminer complètement l'influence des dimensions du personnage, ce lien est représenté par la position cartésienne de l'extrémité dans le repère de l'origine divisée par la taille totale du membre. On obtient ainsi une donnée adimensionnelle.
- des **segments normalisés** qui sont associés à un unique segment (comme la clavicule par exemple). De la même manière que précédemment, on mémorise la position de l'extrémité dans le repère de l'origine divisée par la taille du segment afin de s'abstraire des problèmes de dimension du personnage.
- de la **colonne vertébrale** dont le nombre de segments peut varier en fonction des personnages à animer et qu'il faut donc modéliser sous une forme plus générique qu'une chaîne cinématique. Nous avons choisi d'utiliser une spline qui peut ainsi être subdivisée en autant de segments que l'on désire. La taille de la spline est normalisée afin, une fois encore, de ne pas tenir compte des dimensions du personnage.

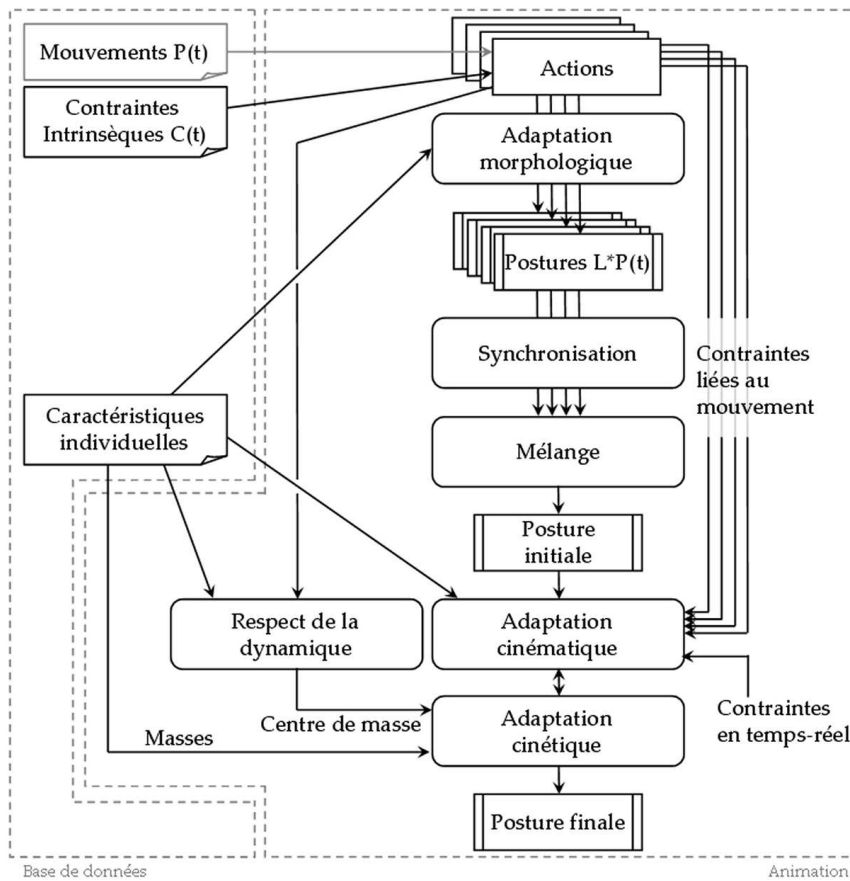


FIG. 3.4 – Aperçu global de *MKM* montrant les fonctionnalités de synchronisation, mélange et adaptation de mouvements stockés sous une forme indépendante de la morphologie dans une base de données.

La figure 3.5 illustre cette représentation. La position globale du personnage est normalisée par la taille de la jambe en faisant l'hypothèse que le personnage se déplace toujours grâce à ses jambes. Au final, on dispose d'un vecteur $P(t)$ pour chaque pas de temps, contenant les différentes informations ci-dessus pour le corps entier. Adapter $P(t)$ à un personnage revient dans un premier temps à dénormaliser les données puis, éventuellement, à résoudre des contraintes cinématiques. Ces contraintes peuvent être intrinsèquement liées au mouvement (comme les appuis qui lui sont liés par exemple) ou ajoutées par l'utilisateur pour l'adapter à un nouvel environnement et de nouveaux problèmes.

Il est important de noter que ces procédures de normalisation et de dénormalisation n'altèrent pas les données cinématiques initiales. Ainsi, si on considère que ces procédures s'appliquent sur le même squelette (sans changement de taille des segments), on retrouve exactement les données initiales. Bien entendu, si les données anthropométriques sont dif-

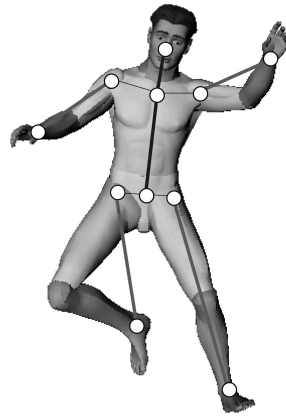


FIG. 3.5 – Squelette normalisé permettant de coder le mouvement efficacement (données adimensionnelles et contraintes géométriques).

férentes, les trajectoires sont modifiées par ces procédures.

Pour simplifier la tâche de l'utilisateur, les contraintes intrinsèquement liées au mouvement peuvent être éditées a priori dans un logiciel développé par Richard Kulpa pendant sa thèse. Ce logiciel génère un fichier *XML* associé à celui contenant $P(t)$. Un aperçu de l'interface assurant cette opération est donné en figure 3.6. Ces contraintes évoluent évi-

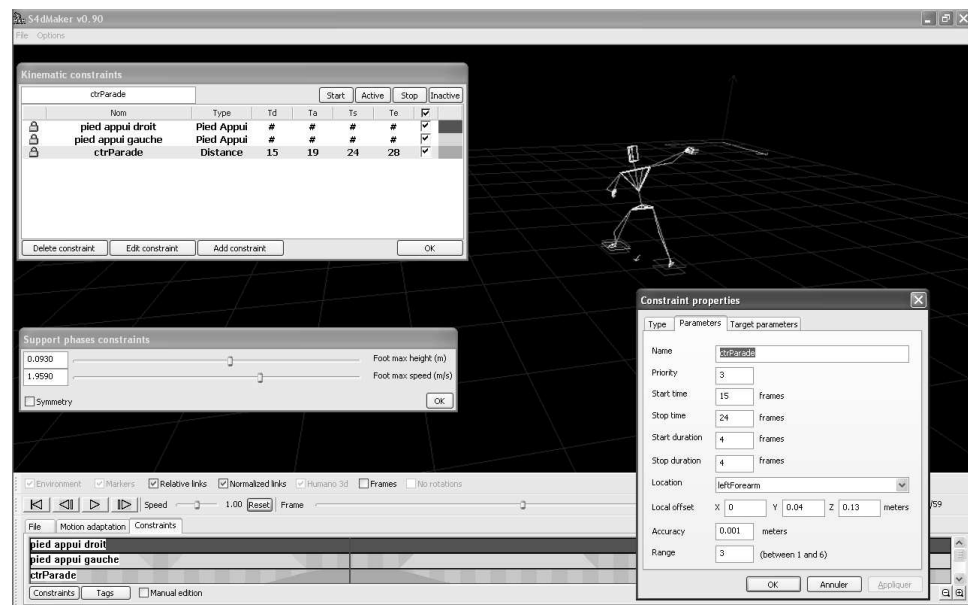


FIG. 3.6 – Interface permettant d'indiquer les phases d'appui et les autres contraintes dans des mouvements élémentaires isolés.

demment au cours du temps. Nous les représentons par $C(t)$ qui s'associe à $P(t)$ pour constituer $Param(t) = \{P(t), C(t)\}$ qui est utilisé pour effectuer toutes les opérations de la figure 3.4.

3.2.2 Synchronisation et mélange

Une fois que les paramètres $P_i(t)$, pour chaque mouvement i , sont mis à l'échelle du personnage en multipliant chaque donnée adimensionnelle par les nouvelles dimensions correspondantes ($L \times P_i(t)$), il reste à mélanger les postures résultantes, si c'est possible. Il est en effet évident que n'importe quel mouvement ne peut pas être mélangé à n'importe quel autre, sous peine d'obtenir des résultats totalement irréalistes. C'est le cas si on cherche à combiner un mouvement de cloche pied droit avec un autre de cloche pied à gauche. A un instant donné, on peut se retrouver à mélanger une posture caractérisée par un appui unique à gauche avec une autre comportant un appui unique à droite. Comme le personnage est supposé évoluer dans un environnement interactif, il n'est pas possible de prédire longtemps à l'avance s'il y a un risque d'incompatibilité entre mouvements. Il n'est donc pas envisageable d'utiliser des approches cherchant à optimiser l'axe des temps de plusieurs mouvements afin de les rendre compatibles [Guo 96, Ashraf 01, Ashraf 00].

Avec cette contrainte d'interactivité, Stéphane Ménardais a proposé de vérifier la compatibilité entre deux postures en ne tenant compte uniquement que des appuis du personnage, et en anticipant uniquement sur quelques instants. Quatre types d'appuis peuvent se produire : \emptyset , LS , RS , DS qui représentent respectivement l'absence d'appui, un appui gauche, droit et double. Nous avons alors proposé un opérateur capable de retourner le résultat du mélange de deux appuis (cf. figure 3.7).

\oplus	DS	RS	LS	Err	\emptyset
DS	DS	RS	LS	Err	\emptyset
RS	RS	RS	Err	Err	\emptyset
LS	LS	Err	LS	Err	\emptyset
Err	Err	Err	Err	Err	\emptyset
\emptyset	\emptyset	\emptyset	\emptyset	\emptyset	\emptyset

FIG. 3.7 – Opérateur indiquant le résultat du mélange de deux appuis (*Err* indique une impossibilité).

En raison de la contrainte d'interactivité, nous avons choisi de raisonner uniquement sur l'appui en cours et le suivant. On suppose que les mouvements sont compatibles jusqu'à l'appui courant et on cherche à savoir si cette compatibilité persiste pour l'appui suivant. Si l'opérateur ne retourne pas d'erreur, les mouvements sont synchronisables, suivant les critères d'appui que nous nous sommes fixés. Sinon, il faut aménager la durée des appuis afin de retrouver une compatibilité [Menardais 04a, Ménardais 03].

Cependant, modifier aveuglément les durées des appuis d'un mouvement peut poser problème. Ainsi, si l'utilisateur souhaite assurer qu'un saut s'exécute le plus rapidement

possible, on ne peut pas retarder indéfiniment son démarrage parce qu'il pose un problème de synchronisation. Chaque mouvement est donc associé à une priorité que l'utilisateur peut aménager pour indiquer l'importance qu'il lui accorde. Cette priorité peut être différente en fonction des parties du corps. Ainsi, une préhension implique une forte priorité des bras en comparaison de celle des jambes. Inversement, une locomotion implique une forte priorité des jambes contrairement à celle des bras.

Ainsi, si deux séquences d'appui S_2 et S_3 sont incompatibles, l'algorithme de déformation choisit de déformer l'axe temporel de celui qui a la plus basse priorité, laissant le plus important se dérouler normalement. La figure 3.8 illustre la tentative de mélange de trois mouvements dont l'appui $k + 2$ (k étant l'appui précédent) présente une incompatibilité. Le résultat trouvé (et représenté sur la figure) consiste à dilater l'axe temporel de S_2 qui a une priorité de 2, inférieure à celle de S_3 , égale à 5.

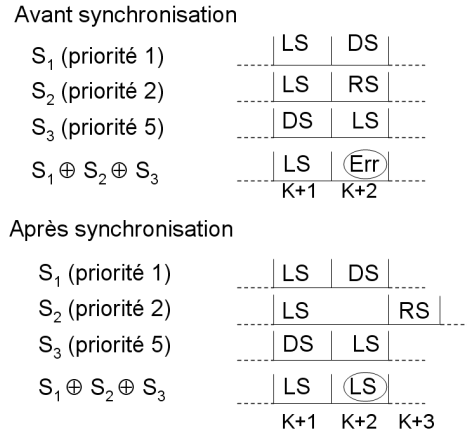


FIG. 3.8 – Synchronisation de trois mouvements ayant des priorités différentes. L'image du haut montre une incompatibilité au pas de temps $k + 2$. L'image du bas montre une solution consistant à étirer l'axe des temps à l'instant $k + 1$ de l'action S_2 sans toucher à S_3 qui a une priorité supérieure.

Une fois les mouvements compatibles entre eux, on peut alors effectuer le mélange en effectuant une somme pondérée des paramètres $P_i(t)$. Le problème consiste à obtenir des pondérations qui assurent la continuité du mouvement et le respect des désirs de l'utilisateur (via les priorités). Pour cela, nous avons mis en œuvre un algorithme itératif qui tient compte de ces contraintes [Ménardais 04b, Ménardais 03]. Cet algorithme permet aussi de rendre un mouvement négligeable (et donc non pris en compte) s'il a une priorité nettement inférieure à d'autres actions qui sont en conflit avec lui. Ceci évite par exemple de perturber la trajectoire de la main lors d'une saisie (à forte priorité) si un mouvement de locomotion est actif en même temps (avec une priorité moindre sur les bras mais pouvant tout de même affecter légèrement la trajectoire). La figure 3.9 montre un résultat obtenu avec trois mouvements différents : une marche et deux séquences de coups de pieds. Un scénario décide de lancer l'un de ces mouvements, sans vérifier à l'avance s'il est compatible ou non avec la séquence en cours. MKM se charge donc de synchroniser les différents mouvements afin

d'assurer que le résultat est cohérent. Dans cette figure, on voit que le sol n'est pas plat. En réalité, il oscille continuellement dans le temps et nécessite donc d'adapter à chaque instant les différents mouvements à cet environnement. C'est ce que nous abordons dans la suite de ce document.

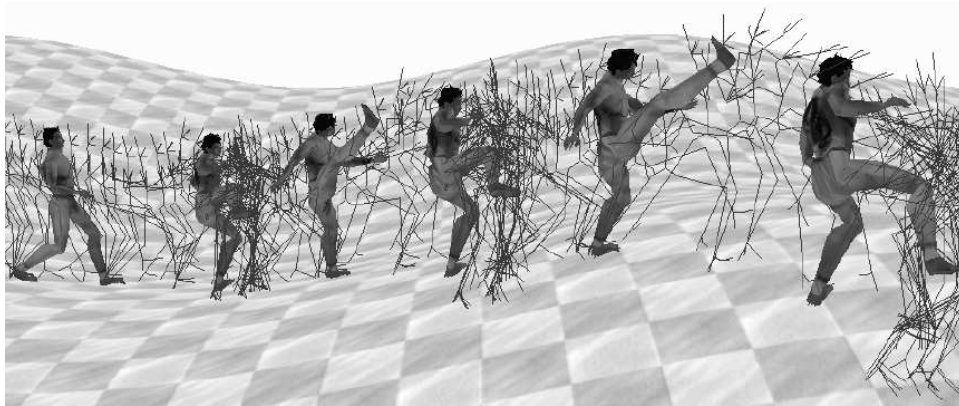


FIG. 3.9 – Mélange de mouvements de combat sur un sol mouvant impliquant une adaptation à l'environnement en temps réel.

3.2.3 Adaptation de mouvements

Lorsque tous les mouvements à effectuer sont mélangés, on dispose alors d'un unique paramètre $Param(t)$ qui contient une posture moyenne $P(t)$ et un ensemble de contraintes à respecter $C(t) = \bigcup_i C_i(t)$. Chaque contrainte est, elle-aussi, associée aux priorités qui ont été associées aux mouvements pour la phase de mélange. Or, le mélange de deux postures respectant chacune leurs contraintes ne produit pas à priori de posture respectant la totalité des contraintes. Il est donc nécessaire d'adapter $Param(t)$ afin qu'il vérifie ces contraintes. A ce niveau, nous rappelons que $Param(t)$ contient une représentation de la posture adaptée à la morphologie du personnage à animer mais toujours sous la forme originale : $L \times P(t)$ qui ne contient pas les angles aux articulations ni d'information sur les articulations intermédiaires (coudes, genoux, vertèbres).

Une première proposition de Stéphane Ménardais consistait à résoudre un problème de cinématique inverse à chaque pas de temps en ne raisonnant que sur une sous-partie du corps. Par exemple, une contrainte cinématique sur la main ne mobilisait que les articulations de l'épaule et du coude. Il était alors possible d'utiliser des méthodes analytiques de résolution [Tolani 00] pour trouver rapidement la posture que le bras devait adopter. L'un des objectifs de la thèse de Richard Kulpa a donc été d'améliorer la spécification des contraintes ainsi que les méthodes de résolution associées. Le but était de proposer un nouveau formalisme pour exprimer les contraintes et des méthodes de résolution impliquant le corps dans son ensemble tout en conservant des temps de calculs compatibles avec des applications interactives.

Comme cela est montré dans la thèse de Richard Kulpa [Kulpa 05a], un grand nombre de contraintes cinématiques peut se rapporter à une contrainte de positionnement d'un point du corps sur un autre point de l'espace. Toutes les contraintes cinématiques envisagées dans notre approche peuvent donc s'exprimer par des égalités qui modélisent un problème de type cinématique inverse. Dans la littérature, ce problème revient à calculer les angles aux articulations afin d'amener des parties du corps sur des positions cartésiennes et implique un calcul lourd de Jacobien et d'inversion par pseudo-inverse. Les données sur lesquelles nous travaillons sont toujours exprimées dans l'espace Cartésien : la position relative d'une extrémité dans le repère de l'origine.

Cette représentation simplifie donc le mode de résolution de contraintes. Ainsi, si on veut poser le pied au sol étant donnée une position connue du bassin, l'opération est presque immédiate. Il suffit de changer la position relative du pied dans le repère de la hanche pour assurer exactement la contrainte avec très peu de calculs. Donc, si les contraintes appliquées aux extrémités sont directement atteignables, il suffit de modifier directement la donnée correspondante.

C'est ce type d'approche qui a été choisi pour gérer le problème particulier des appuis au sol (cf. figure 3.10). Grâce à la représentation choisie pour la posture, aucun calcul de cinématique inverse ni de conversion en angles n'est nécessaire à cette étape pour positionner correctement le corps et les extrémités aux bonnes positions.

Pour les autres contraintes, le problème est différent puisqu'elles peuvent s'appliquer sur n'importe quelle partie du corps et ne se limitent pas aux extrémités. Nous avons donc regroupé les segments corporels au sein de groupes et proposé des solutions analytiques spécifiques à chacun, pour chaque type de contraintes rencontré. Les groupes sont illustrés en figure 3.11.

Les solutions mises en œuvre vérifient que les contraintes associées à une priorité élevée soient vérifiées. Celles comportant une faible priorité sont résolues au mieux, sans compromettre les contraintes plus importantes, suivant la même philosophie que les approches développées à l'EPFL [Baerlocher 04]. Au sein de chaque groupe, le nombre limité de degrés de liberté implique un nombre restreint de contraintes pouvant être prises en compte en raison de cette politique. Par exemple, pour un bras, 4 degrés de liberté peuvent être envisagés si bien qu'uniquement 2 contraintes cartésiennes seulement peuvent être appliquées. Nous avons proposé des solutions analytiques pour tous les cas de figure et pour tous les groupes. Pour les membres, par exemple, la résolution s'inspire de celle proposée par Tolani et coll. [Tolani 00].

Cette approche n'est valable que si les contraintes sont atteignables en ne mobilisant qu'un seul groupe. Sinon, il est nécessaire de faire intervenir les autres groupes pour tenter de résoudre la contrainte. Par exemple, pour saisir un objet lointain, il peut être nécessaire de pencher le tronc et même de déplacer la racine du personnage. Dans ce cas, nous appliquons un algorithme itératif qui mobilise les groupes les uns après les autres. Afin de minimiser l'énergie mise en jeu et ainsi éviter des postures non réalistes, nous partons de ceux qui sont les plus éloignés du bassin (mobilisant le moins de masses) aux plus proches (mobilisant leur propre masse ainsi que celles des segments qui sont fils dans la hiérarchie). L'hypothèse de minimisation d'énergie est généralement bien admise pour un grand nombre de mouvements. Cependant, elle peut être discutable pour des gestes très rapides où la performance de vitesse prime. C'est ce que nous avons étudié dans le cas particulier du

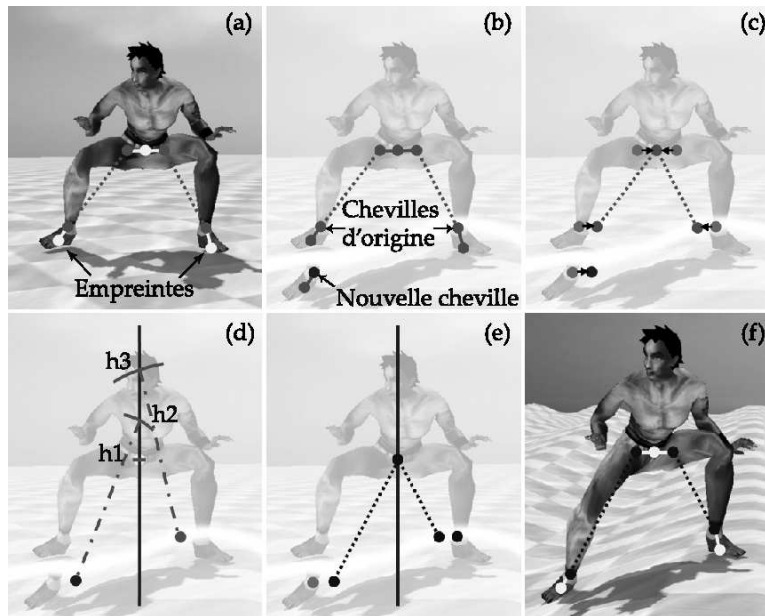


FIG. 3.10 – Adaptation rapide de la posture à un sol non plat. Plusieurs étapes : (a) la posture de référence. (b) les positions initiales et désirées des chevilles sont déterminées. (c) La largeur du bassin est supprimée de toutes les positions afin d'exprimer les articulations relativement à la racine. (d) Trois hauteurs sont calculées : celle qui préserve la racine d'origine ($h1$) et les deux hauteurs maximales que la racine peut atteindre si les jambes sont tendues. (e) La hauteur minimale est choisie afin de respecter les trois critères. (e) La largeur du bassin est ajoutée pour retrouver les positions finales des chevilles. (f) L'adaptation des jambes est alors automatique avec la représentation normalisée.

handball [Fradet 04]. Il serait donc possible d'envisager de mettre en place un algorithme d'ordonnancement adaptable à la situation. Cependant, nous ne disposons pas des informations nécessaires pour définir cet algorithme. Néanmoins, c'est un point d'entrée pour tester différentes hypothèses sur la génération de postures afin de comparer les résultats de simulation à des mesures expérimentales.

En prenant l'hypothèse de minimisation d'énergie, l'algorithme général d'adaptation cinématique est donc le suivant :

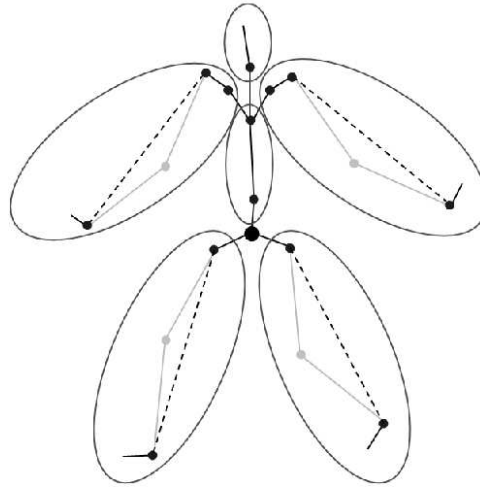


FIG. 3.11 – Décomposition du corps humain en groupes. Pour chaque groupe, un ensemble de solutions analytiques sont proposées pour résoudre toutes les contraintes pouvant lui être associées.

fonction adaptationCinématique()

it = 0

Faire

adaptationCmGroupe(Tête)

adaptationCmGroupe(Bras droit)

adaptationCmGroupe(Bras gauche)

Si (Pied droit non en contact avec le sol)

adaptationCmGroupe(Jambe droite)

Fin du Si

Si (Pied gauche non en contact avec le sol)

adaptationCmGroupe(Jambe gauche)

Fin du Si

adaptationCmGroupe(Tronc)

adaptationCmRacine()

terminé = *calculCmErreur()*

it = *it* + 1

Tant que (*it* < *maxIt*) & (\neg *terminé*)

où *it* est l'itération courante, *maxIt* est le nombre maximum d'itérations souhaité et *terminé* est un booléen qui a pour valeur *vrai* lorsque l'adaptation est achevée. Adapter ou non la racine du personnage entraîne aussi un choix de stratégie de contrôle moteur : faire intervenir ou non le déplacement du bassin pour résoudre une contrainte. Dans l'exemple de la figure 3.12, la posture de référence (notée *a*) ne permet pas au pied d'atteindre la contrainte matérialisée par une sphère. Après avoir adapté le groupe de la jambe, le pied s'est rapproché de la cible mais ce n'est pas suffisant (image *b*). Si la racine du personnage

est déplacée vers le haut, le pied atteint cette fois la cible (image *c*). Cependant, pour atteindre cette même cible, nous aurions pu d'abord déplacer complètement le bassin vers le haut puis tendre la jambe, ce qui aurait donné un résultat différent. En fait, on se retrouve à choisir une stratégie afin de résoudre un problème de redondance. Nous avons choisi de laisser l'utilisateur décider de la stratégie à adopter en offrant un paramètre appelé *CmRacine* variant de 0 (pas de mouvement du bassin pour résoudre la contrainte) à 1 (mouvement complet du bassin).

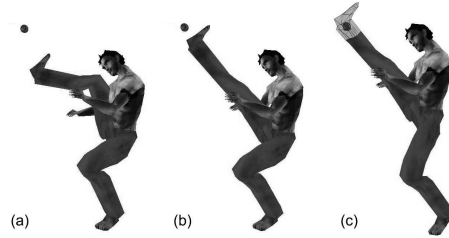


FIG. 3.12 – Adaptation d'une posture de référence (a) afin de positionner le pied du personnage sur une sphère. (b) Utilisation uniquement des jambes pour résoudre le problème. (c) Ajout d'une translation du bassin pour compléter la résolution.

A propos de cette stratégie, il serait aussi possible de confronter les mouvements simulés en utilisant différentes valeurs de *CmRacine* à des données expérimentales pour rechercher la stratégie moyenne couramment rencontrée. Nous pouvons faire l'hypothèse que cette stratégie varie en fonction du type de population (il peut y avoir des adaptations dues à certaines pathologies neurologiques ou à des problèmes de perception). De plus, les déplacements du bassin, qui entraînent des masses importantes, ont une influence importante sur l'équilibre. Pour mieux appréhender ce problème nous devons être capables de prendre en compte la position du centre de masse dans notre processus.

3.2.4 Prise en compte du centre de masse

Le centre de masse d'un personnage joue un rôle important puisqu'il permet de caractériser la répartition des masses du sujet en fonction de sa posture. Il a une influence directe sur des problèmes d'équilibre et est utilisé pour représenter le système mécanique de l'humanoïde complet. Un centre de masse peut être calculé pour chaque segment en fonction de tables anthropométriques moyennes (par exemple, [Zatsiorsky 90]) ou de données imposées par une morphologie particulière de l'humanoïde synthétique. Dans ce calcul du centre de masse, on peut intégrer l'influence des vêtements ou de tout objet porté par l'humanoïde. Ainsi, pour chaque groupe défini précédemment, on peut calculer un centre de masse local qui dépend de sa configuration. Ainsi, le centre de masse global est la somme pondérée des centres de masse locaux à chaque groupe :

$$COM = \frac{\sum_g (m_g COM_g)}{\sum_g m_g} \quad (3.1)$$

où COM est le centre de masse, m_g est la masse du groupe g et COM_g son centre de masse local. Si on cherche à appliquer une contrainte sur COM , il faut être capable de modifier chaque groupe afin qu'il contribue à résoudre la contrainte globale. Soit COM' la position du centre de masse imposée par la contrainte. Si on cherche à isoler l'influence du groupe G sur ce centre de masse, on obtient :

$$COM' = \frac{\sum_{g \neq G} (m_g COM_g)}{\sum_g m_g} + \frac{m_G COM'_G}{\sum_g m_g} \quad (3.2)$$

COM'_G représente la position souhaitable pour le centre de masse du groupe G , que l'on cherche à trouver sachant que COM' est imposé et que le reste des groupes n'est pas modifié. On en déduit donc la position désirée du centre de masse local du groupe G :

$$COM'_G = \frac{\sum_g m_g * COM' - \sum_{g \neq G} (m_g COM_g)}{m_G} \quad (3.3)$$

Une fois que l'on connaît la position de COM'_G pour un groupe G , il reste à définir comment modifier G afin d'amener COM_G sur COM'_G . De la même manière que pour résoudre des contraintes cinématiques, nous avons proposé des méthodes analytiques spécifiques à chaque groupe pour résoudre ce problème. Globalement, il existe deux grandes méthodes. Pour les segments seuls (groupes de la tête et du tronc), il suffit donc d'utiliser une rotation afin de rapprocher le centre de masse local COM_G vers la position souhaitée COM'_G . Pour les membres, composés de deux segments, l'adaptation s'effectue en deux temps :

- extension du membre pour placer COM_G à la même distance que COM'_G de l'articulation proximale (cf. figure 3.13a) ;
- puis rotation du membre pour placer COM_G au plus près de la position COM'_G (cf. figure 3.13b). La figure 3.13c montre la posture finale obtenue.

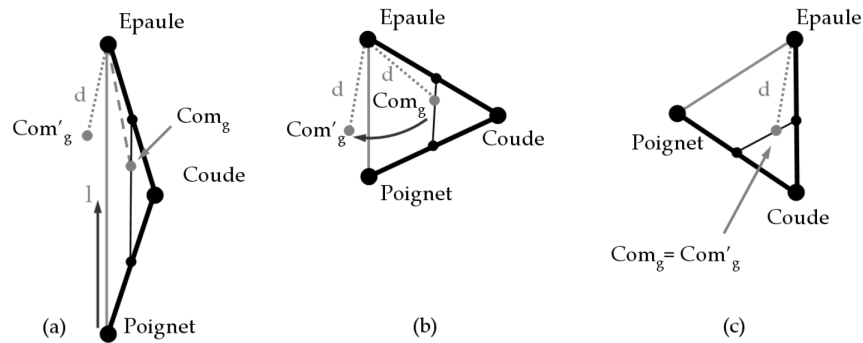


FIG. 3.13 – Adaptation des membres en deux étapes. (a) Posture de référence. (b) La longueur variable du membre est changée de manière à placer COM_G à la même distance que COM'_G de l'épaule. (c) Une rotation est effectuée pour placer COM_G sur COM'_G .

Comme pour la résolution de contraintes cinématiques, positionner COM sur COM' peut nécessiter la mobilisation de plusieurs groupes. De plus, pour un déplacement donné

du centre de masse, il faut pouvoir décider quel groupe faire intervenir en premier. Mobiliser en premier les segments ayant les masses les plus faibles entraînerait de grands déplacements pour influencer la position du centre de masse. L'humanoïde se trouverait alors à gesticuler énormément pour compenser de faibles déplacements du centre de masse, impliquant des hautes énergies. Nous avons donc choisi de mobiliser prioritairement les masses les plus lourdes qui ont un effet plus important sur le centre de masse et nécessitent donc moins de déplacements. Les segments de masse faible ne sont mobilisés que si cette première étape n'a pas suffi.

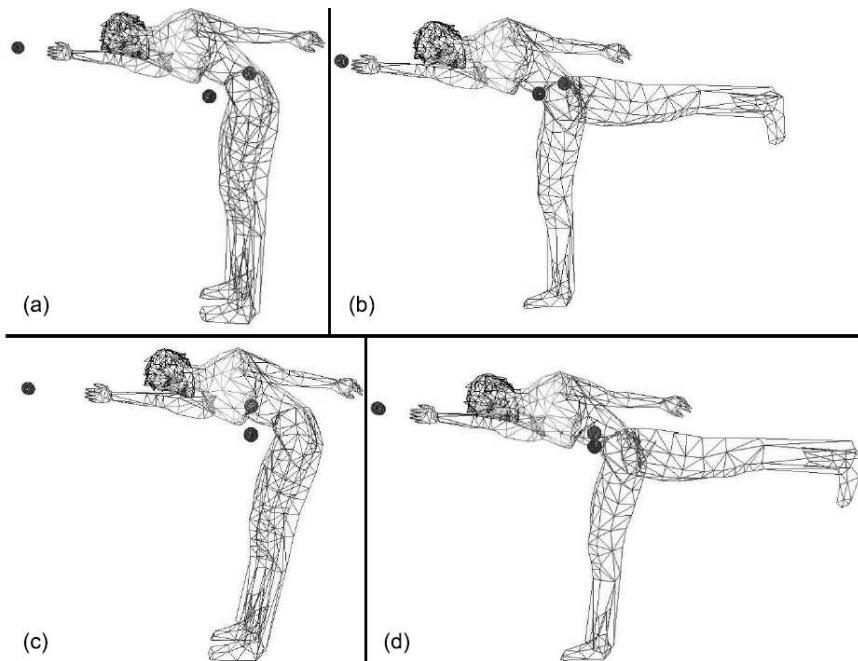


FIG. 3.14 – Stratégies de déplacement du centre de masse d'un personnage devant toucher une sphère placée loin devant lui. On impose aussi au personnage de placer son centre de masse de manière à conserver son équilibre (une sphère indiquant le centre de masse courant et l'autre la contrainte à respecter). a) aucun respect du centre de masse. b) $CnRacine = 0$, aucun déplacement du bassin pour contrôler la position du centre de masse. c) $CnRacine = 1$ résolution uniquement en bougeant le bassin. d) combinaison des deux stratégies.

Là encore, des stratégies différentes de contrôle peuvent être choisies : mobiliser plus ou moins le bassin pour résoudre la contrainte. En effet, pour avancer son centre de masse de quelques centimètres, un sujet peut avancer son bassin et corriger sa posture en conséquence en ne mobilisant pas les bras, le tronc et la tête. À l'inverse, s'il souhaite ne pas déplacer prioritairement son bassin, il peut avancer les bras, sa tête et, éventuellement, lever une jambe. Il peut aussi choisir un compromis de ces deux stratégies. Encore une fois, nous avons laissé l'utilisateur choisir la stratégie via un paramètre appelé $CnRacine$ variant de

0 (pas de déplacement du bassin) à 1 (déplacement prioritaire du bassin). L'influence de ce paramètre est illustré sur la figure 3.14. Dans cette figure, la cible n'est pas atteignable sans remettre en cause la contrainte sur le centre de masse. L'utilisation combinée des deux stratégies est donc nécessaire pour respecter au mieux les contraintes imposées.

Grâce à la similarité des algorithmes proposés pour les adaptations cinématique et cinétique, il est en effet possible de combiner les deux résolutions en une seule boucle :

```

fonction adaptationCinématiqueEtCinétique()
  adaptationCompleteSol()
  it = 0
  EGC = ensembleGroupesPourCinétique()
  Faire
    adaptationCmGroupe(Tête)
    adaptationCmGroupe(Bras droit)
    adaptationCmGroupe(Bras gauche)
    adaptationCmGroupe(Jambe droite)
    adaptationCmGroupe(Jambe gauche)
    adaptationCmGroupe(Tronc)
    adaptationCmRacine()
    adaptationRapideSol()
    Si ( $CnErreur_k > CnErreurMax$ )
      Si ( $EGC = \emptyset$ )
        adaptationCnRacine(100%)
        adaptationRapideSol()
      Sinon
        adaptationCnRacine(CnRacine)
        adaptationRapideSol()
        adaptationCnGroupes()
        adaptationCnRacine(100%)
        adaptationRapideSol()
      Fin du si
    Fin du si
    it = it + 1
  Tant que ( (it < maxIt) & ( $\neg termin\acute{e}$ ) )

```

Cet algorithme [Kulpa 05b] revient à effectuer les deux adaptations séquentiellement au cours d'une itération. Cependant, le critère d'erreur $CnErreurMax$ sur le centre de masse est directement inséré dans la boucle itérative afin d'éviter de faire des adaptations cinétiques inutiles. En effet, l'adaptation cinématique requiert généralement beaucoup plus d'itérations que la cinétique, surtout lorsque les contraintes se rapprochent de leurs cibles. Par conséquent, plusieurs itérations seraient calculées pour rien au niveau de la cinétique entraînant une augmentation des temps de calcul. Ce terme est donc enlevé du critère d'arrêt final mais intervient indirectement en ne calculant pas l'adaptation cinétique si l'erreur au niveau de la position du centre de masse est insuffisante.

La figure 3.15 montre une scène où 40 personnages sont animés à partir de cibles déplacées interactivement dans l'espace grâce à une souris. Les performances permettent d'animer de 40 (nombreuses contraintes inatteignables) à plus de 400 (peu de contraintes

proches) humanoïdes à 30Hz sur un PC portable classique.



FIG. 3.15 – Plusieurs personnages de taille différente doivent résoudre les mêmes contraintes (deux aux poignets et deux aux pieds) en respectant l'équilibre (une contrainte supplémentaire sur le centre de masse) et en temps réel. Les deux personnages superposés devant montrent la différence de posture si l'équilibre n'est pas contrôlé.

Dans ces approches, nous avons fait des choix arbitraires : si plusieurs solutions étaient possibles pour résoudre les contraintes, nous avons laissé la possibilité à un utilisateur de guider la résolution via des variables (comme *CnRacine* et *CmRacine*). En fait, d'autres paramètres sont accessibles. Il est ainsi possible de paramétrer la souplesse d'un personnage qui peut ou non atteindre le sol avec ses mains sans plier les jambes. Tous ces choix et ces paramètres pourraient être remplacés par des hypothèses sur le contrôle moteur. Il serait alors possible de tester leur influence sur le geste et confronter les résultats obtenus à des données expérimentales.

Une fois que l'on dispose d'un contrôle de la posture via le centre de masse, nous avons cherché à proposer un module de pilotage de *COM* qui puisse rendre le mouvement plus réaliste. Sur le système restreint du centre de masse, on peut relativement facilement effectuer le bilan des forces externes et ainsi déterminer les équations mécaniques de son mouvement.

3.2.5 Prise en compte de la dynamique

Les travaux précédents se focalisent sur la résolution de contraintes cinématiques et cinétiques. Les contraintes dynamiques ne peuvent pas être résolues (ni même spécifiées) avec ces méthodes. Pour rester compatible avec des applications interactives, nous n'avons pas voulu développer des modèles dynamiques coûteux en temps de calcul. Nous avons préféré mettre en œuvre des méthodes d'adaptation de mouvements qui modifient les trajectoires calculées afin de vérifier des lois élémentaires de la mécanique (accélération égale à la gravité pendant une phase aérienne, gestion des forces au sol pendant une phase préparatrice à un saut). Pour mener ce travail, deux doctorants ont collaboré : un en biomécanique (Carole Durocher [Durocher 06a]) et un en informatique (de nouveau Richard Kulpa).

Le principe consiste à contrôler uniquement le centre de masse et à utiliser le module de cinétique et de cinématique inverse pour adapter la gestuelle en conséquence. Ainsi, pendant une phase aérienne, le centre de masse doit suivre une trajectoire parabolique qui entraîne directement une modification de la gestuelle. Pour la phase préparatrice à la phase aérienne (l'impulsion), nous cherchons à adapter le déplacement du centre de masse en fonction des conditions (position et vitesse) initiales et finales (qui dépendent de la trajectoire aérienne qui doit être produite). Nous ne contrôlons donc pas les efforts appliqués aux articulations qui nécessiteraient un calcul plus important.

Dans un premier temps, avec Carole Durocher, nous avons choisi de calculer et de modéliser les forces mises en jeu dans un mouvement initial puis de les adapter forces à de nouvelles contraintes de sauts [Durocher 06b]. Les forces étaient modélisées par des splines hiérarchiques dont seuls les points de contrôle principaux (de niveau le plus faible) étaient optimisés, pour limiter les temps de calcul. En développant la relation fondamentale de la dynamique, on obtenait donc le lien entre la variation de vitesse du centre de masse et l'intégrale des forces :

$$m(v_L^0 - v_0^0) = g(K) \quad (3.4)$$

où m est la masse, v_L^0 est la vitesse du centre de masse au début de la phase aérienne et v_0^0 est celle qui existe au début de la phase d'impulsion dans le mouvement d'origine. $g(k)$ est la fonction qui reconstruit l'intégrale des forces pendant cette période en fonction des points de contrôle K . Adapter ce mouvement à de nouvelles conditions revient à chercher comment évolue K pour que v_L devienne compatible avec les contraintes cinématiques (durée du vol, altitude, distance parcourue) et donc à inverser g . En linéarisant localement au premier ordre :

$$\Delta K = J^+(K_0) (m(v_L - v_0) - m(v_L^0 - v_0^0)) \quad (3.5)$$

où J^+ est la pseudo-inverse de la Jacobienne de g et v_L (resp. v_0) est la vitesse finale (resp. initiale) à respecter pour résoudre les nouvelles contraintes. Comme le système est sous-contraint, il existe une infinité de solutions dont la plupart peuvent conduire à des mouvements non naturels. Nous avons donc ajouté deux contraintes supplémentaires h_1 et h_2 qui représentent respectivement la minimisation des forces mises en jeu et le respect de l'altitude du centre de masse au début de la phase de vol. L'équation devient :

$$\Delta K = J^+(K_0) (m(v_L - v_0) - m(v_L^0 - v_0^0)) + (I - J^+(K_0)J(K_0))(h_1 + h_2) \quad (3.6)$$

où $(I - J^+(K_0)J(K_0))$ est la projection de $h_1 + h_2$ dans l'espace des solutions de l'équation 3.5.

Cependant, travailler avec des forces alors que les contraintes sont géométriques implique de continuellement effectuer des doubles intégrations et dérivations qui posent des problèmes numériques sur des données mesurées. Malgré les résultats prometteurs obtenus avec cette approche, nous avons ensuite préféré travailler directement sur la trajectoire du centre de masse [Kulpa 05a]. De la même manière que pour les forces, nous avons cherché une représentation paramétrique utilisant des points de contrôle pour modéliser la trajectoire du centre de masse. Nous disposons donc encore une fois d'un espace réduit de paramètres. Pour un mouvement de saut, on trouve classiquement 3 principaux points de contrôle délimitant des sous-phases d'amortissement, de P_1 à P_2 , et de propulsion, de P_2

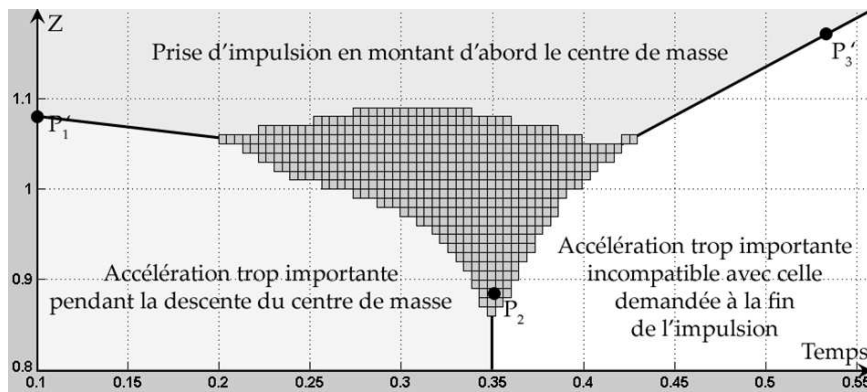


FIG. 3.16 – Zone dans laquelle le deuxième point de contrôle peut théoriquement se trouver.

à P_3 (cf. figure 3.16). On voit sur cette figure que le premier et le dernier point sont imposés par les conditions initiales et finales. Si on considère que l'on connaît les positions, vitesses et accélérations en P_1 et P_3 , il reste donc à caractériser la position et la vitesse en P_2 . Vu le nombre de paramètres, nous avons choisi de représenter cette trajectoire par un polynôme de degré 7 qui semble bien adapté aux données expérimentales comme le montre la figure 3.17. Vu les contraintes mécaniques et l'ordre du polynôme, P_2 ne peut évoluer que dans une zone restreinte afin de :

- ne pas descendre plus vite que la gravité,
- conserver une phase d'amortissement suivi d'une phase de poussé,
- et éviter des accélérations importantes qui ne permettraient pas d'atteindre le troisième point de contrôle sans modifier la forme générale de la courbe.

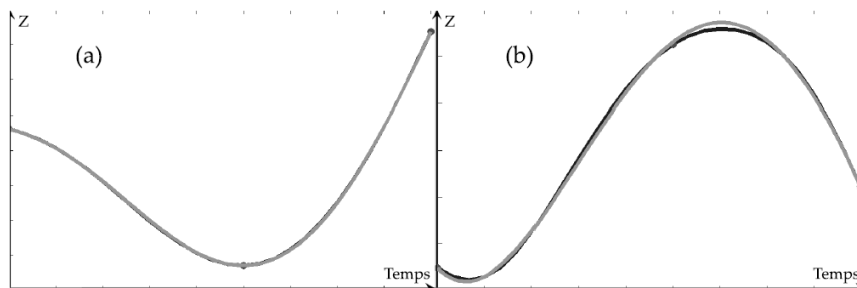


FIG. 3.17 – Comparaison entre une trajectoire (altitude du centre de masse en (a) et sa dérivée en (b)) expérimentale et modélisée par un polynôme de degré 7 lors d'un saut vertical.

La figure 3.18 montre comment cette zone de recherche évolue en fonction de la vitesse imposée au décollage, au troisième point de contrôle. Une méthode d'optimisation est alors mise en œuvre pour calculer le deuxième point de contrôle qui appartient à cette zone tout en se rapprochant le plus de celui naturellement présent dans le mouvement d'origine.

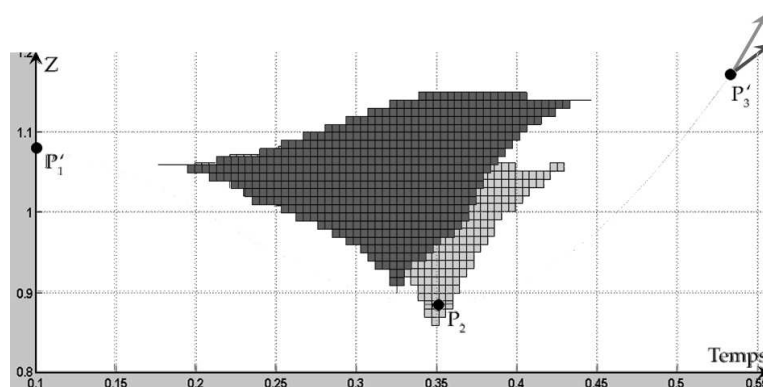


FIG. 3.18 – Décalage de la zone de recherche en fonction des conditions initiales et finales de position et de vitesse. La zone sombre correspond aux positions possibles pour P_2 dans le cas où le vecteur vitesse au décollage est celui représenté aussi en sombre (et réciproquement pour la zone claire).

La figure 3.19 montre un exemple d'utilisation de cette méthode pour un saut vers l'avant. Dans cet exemple, le but est de contrôler l'altitude maximale atteinte par le centre de masse. A gauche, on peut voir le mouvement d'origine. A droite, on voit comment le mouvement est adapté pour atteindre une hauteur moitié moins importante.

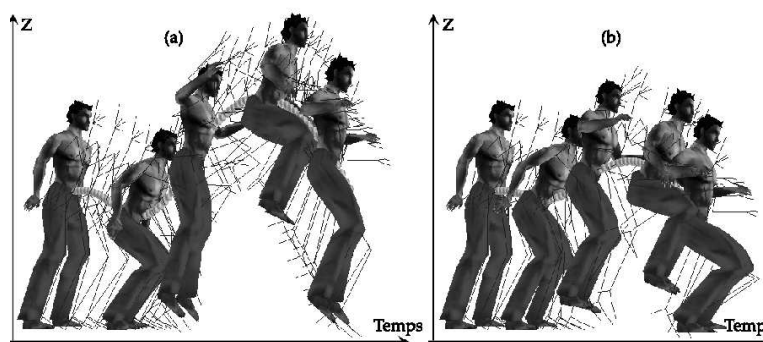


FIG. 3.19 – Résultats montrant deux séquences de saut à différentes hauteurs à partir d'un même mouvement initial.

Ces résultats sont préliminaires mais montrent que l'on peut effectuer un contrôle dynamique avec un faible temps de calcul (une centaine de personnages en temps réel sur un ordinateur standard). Nous travaillons actuellement pour rendre cette approche plus générique.

3.2.6 Prise en compte des émotions

Comme nous l'avons évoqué au début de ce chapitre, les contraintes que doit vérifier un humanoïde sont cinématiques, dynamiques et liées au style. Même si on spécifie des contraintes cinématiques et dynamiques, il reste en effet un grand nombre de mouvements possibles vu la complexité du corps humain. Depuis quelques années, de nombreux travaux ont ainsi cherché à caractériser le style et les émotions dans un mouvement capturé. Sur ce sujet, il existe aussi plusieurs travaux menés dans les neurosciences. Pour les gestes de communication, l'équipe de N. Badler a proposé un modèle cinématique agissant sur les fréquences et les amplitudes de trajectoires articulaires afin de générer des gestes contenant de l'émotion [Chi 00]. Ce type de modèle est inspiré de recherches menées en psychologie [Wallbott 98]. C'est donc clairement un sujet qui peut amener les deux communautés à travailler ensemble.

Dans le cadre d'un projet CNRS ROBEA (projet HuGEx) et d'une thèse financée par le conseil régional de Bretagne (thèse d'Alexis Héloir co-dirigée avec Sylvie Gibet du VALORIA de l'Université Bretagne Sud), nous cherchons à définir les outils de base pouvant servir à un tel travail. Ce travail s'effectue dans le cadre de la langue des signes françaises mais pourrait certainement s'appliquer à d'autres gestes. Notre approche s'inspire des travaux cherchant à caractériser la différence entre un mouvement dit "neutre" d'un autre chargé d'émotions ou utilisant un style différent [Amaya 96, Brand 00, Hsu 05]. Les analyses en composantes principales (ACP) et les analyses en composantes indépendantes (ACI) ont été largement étudiées pour animer un mouvement tout en préservant le style contenu dans des données capturées [Cao 03, Glardon 04, Safonova 04]. Cependant, ces approches ne prenant pas le temps en compte ne peuvent pas caractériser les transformations temporelles induites par le style.

Caractériser ces transformations temporelles fait généralement appel à des algorithmes de type *Dynamic Time Warping* noté DTW (que l'on pourrait appeler algorithmes d'alignement temporel) [Myers 81]. Le principe est de chercher une fonction non-uniforme de déformation de l'axe temporel d'un mouvement pour qu'il corresponde au mieux à un second. L'algorithme revient à calculer une matrice de distances entre toutes les paires de points appartenant à deux séquences. Dans cette matrice, on cherche ensuite un chemin menant de la première donnée à la dernière tel qu'il minimise le cumul de coûts indiqués dans la matrice. La programmation dynamique est généralement utilisée pour résoudre ce dernier problème. Elle consiste à tester tous les chemins possibles et prend donc beaucoup de temps de calcul.

Cette méthode a été utilisée pour aligner des mouvements afin de les rendre compatibles pour un algorithme de mélange [Kovar 03]. On peut aussi obtenir une fonction de déformation du temps faisant passer d'un mouvement dit "neutre" à une autre réalisation contenant un style plus prononcé de manière automatique [Hsu 05] ou semi-assistée [Shapiro 06].

Le principal problème à résoudre est la définition d'une fonction de distance entre des postures de deux mouvements qui soit plus sensible à des changements temporels que spatiaux. Dans le cas contraire, deux événements arrivant au même instant mais avec une amplitude différente ont la même distance que deux postures distantes dans le temps mais ayant la même amplitude. Cette confusion conduit à des fonctions de transformation temporelle qui n'ont pas de sens.

Pour limiter ce problème, nous avons proposé de coupler plusieurs approches [Heloir 06a].

Pour diminuer l'influence des variations temporelles, nous avons choisi de travailler dans l'espace des principales composantes fournies par une analyse en composantes principales (ACP) des mouvements comme le suggère [Forbes 05]. Ainsi, un mouvement dit "neutre" est décrit comme une matrice M_{ref} de n lignes (autant que d'images) et m colonnes (autant que de degrés de liberté). Les principaux vecteurs propres sont extraits de M_{ref} en utilisant une décomposition en valeurs singulières (SVD) :

$$M_{ref} = U_{ref} \Sigma_{ref} V_{ref}^T \quad (3.7)$$

où U_{ref} et V_{ref} sont des matrices unitaires orthogonales issues du processus SVD, et U_{ref} est une base orthonormale décrivant la succession de postures. Ainsi, toute réalisation i du mouvement avec un style différent donne lieu à une matrice M_i qui peut se projeter dans cette base pour limiter l'influence des modifications d'amplitudes :

$$V_i^T = \Sigma_{ref}^+ U_{ref}^T M_i \quad (3.8)$$

où Σ_{ref}^+ la transposée de Σ_{ref} dans laquelle chaque valeur non nulle est remplacée par sa réciproque, et V_i est la projection de M_i dans la base U_{ref} . Dans cet espace, la distance entre deux postures est donc moins sensible à des modifications d'amplitudes. Nous adaptons ensuite un algorithme DTW rapide qui permet de restreindre la programmation dynamique à une zone plus ou moins large autour de la diagonale. De plus, l'algorithme de DTW rapide adopte une stratégie hiérarchique qui permet de trouver un chemin grossier qui est affiné de manière itérative. En plus d'être accéléré, cet algorithme évite de mettre en correspondance des postures trop éloignées dans le temps mais très semblables [Salvador 04]. L'adaptation que nous avons proposée porte sur l'ajout d'une contrainte sur la continuité de la fonction de transformation temporelle pour éviter les artefacts couramment rencontrés avec ces méthodes.

Nous avons appliqué cette méthode à un corpus de mouvements de la langue des signes pour lequel nous avons demandé à un signeur professionnel de répéter plusieurs fois les mêmes bulletins météo en faisant varier le style (colère, fatigue...). Un résultat est donné en figure 3.20 où l'on voit une succession de postures d'un bulletin réalisé avec un style "neutre" (en haut), en dilatant uniformément la séquence de style "colère" (milieu) et en appliquant notre méthode sur cette même séquence (en bas). On constate une meilleure correspondance entre les postures du bas et du haut à un même instant qu'en utilisant un alignement temporel uniforme. Ceci montre que l'on a bien capturé les subtilités des transformations temporelles faisant passer d'un style à l'autre.

La figure 3.21 permet de comparer les résultats obtenus grâce à notre approche (en bas) avec des méthodes de DTW classique (deuxième ligne), de DTW contraint (troisième ligne). Ceci a été testé sur les deux réalisations du même bulletin météo présentées dans la première ligne (trait plein et trait avec pointillés). On peut constater que les approches DTW classiques génèrent des lignes horizontales qui n'ont pas de sens et engendrent des discontinuités dans le geste. Nous avons aussi testé une autre variante appelée DTW contraint qui permet d'éviter les discontinuités générées par l'algorithme DTW classique. Ces discontinuités interviennent quand le chemin implique de rester plusieurs pas de temps sur une même posture pour synchroniser deux signaux. Le DTW contraint offre d'ailleurs de meilleurs résultats mais les deux séquences ne sont pas très bien recalées temporellement. Notre méthode offre les meilleurs résultats de ce test.

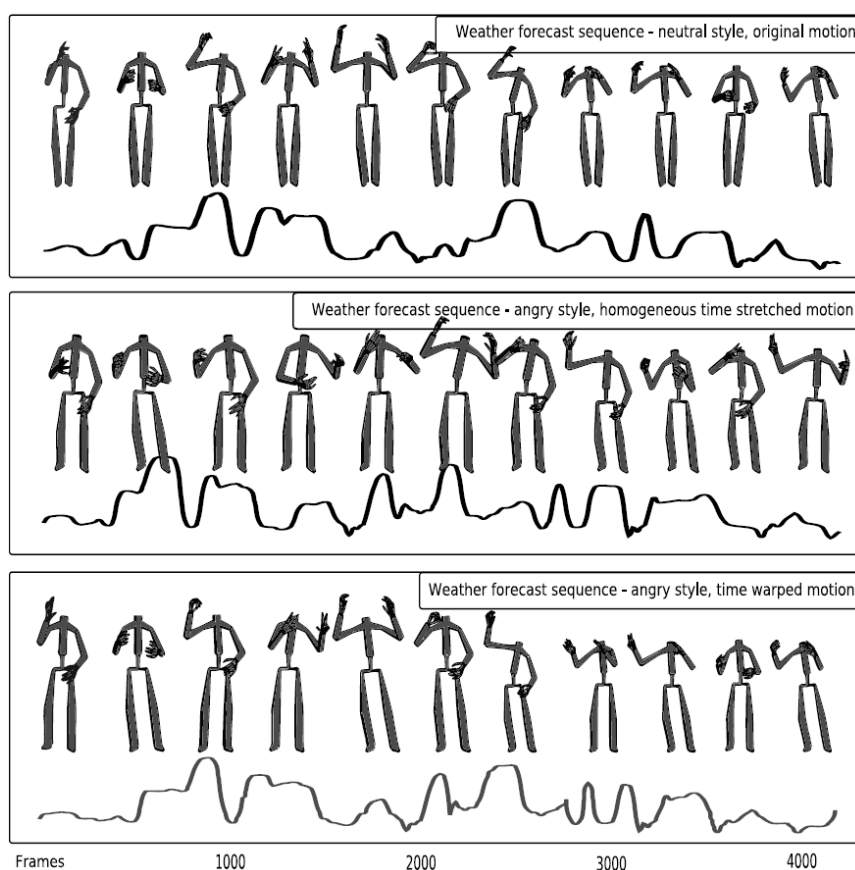


FIG. 3.20 – Postures décrivant un bulletin météo réalisé avec le style "neutre" (en haut), en appliquant une transformation homogène du temps à partir d'un style "colère" (au milieu) et en appliquant notre méthode sur le même style (en bas).

Notre approche définit donc des fonctions de transformation du temps qui permettent de passer d'un style à un autre dans la synthèse de gestes de la langue des signes. Les méthodes cinématiques qui modifient les caractéristiques (amplitude et fréquence) des gestes de manière homogène quel que soit le geste étudié sont peut-être trop génériques. L'avantage de notre méthode est de proposer une fonction de transformation adaptée à chaque séquence gestuelle. Il serait intéressant de rechercher ensuite s'il existe des éléments communs ou s'il y a, plus probablement, des adaptations liées aux gestes eux-mêmes.

Ce travail est préliminaire et il nous reste un grand nombre d'améliorations à proposer. Tout d'abord, il est nécessaire de valider cette approche sur un plus grand nombre d'échantillons et de mener des expérimentations auprès de signeurs pour vérifier qu'ils reconnaissent les signes produits ainsi que le style qu'ils sont supposés contenir. Il faudrait aussi essayer cette méthode sur d'autres types de mouvements. Il subsiste un problème

dans le cas où le style implique des répétitions qui ne sont pas contenues dans la réalisation "neutre". C'est le cas lorsqu'une personne en colère répète rapidement un même mouvement vertical de la main alors que ce geste n'est présent qu'une seule fois dans le style "neutre". Il nous faut évidemment aussi gérer les transformations spatiales.

3.3 Conclusion et perspectives

Conformément à la figure 2.1, cette contribution offre une modélisation du squelette et du mouvement humain. Nous avons aussi introduit un module de simulation pouvant intégrer plusieurs hypothèses sur le contrôle moteur à tester. Dans ce travail, nous avons posé plusieurs hypothèses, mais il serait possible de les changer pour en tester d'autres. Cependant, tous les éléments de notre approche ne sont pas ouverts. Ainsi, il n'est pas prévu de modifier les algorithmes de résolution de contraintes cinématiques et cinétiques liées à chaque groupe. On peut toutefois choisir un ordre différent de résolution pour tester d'autres hypothèses que celle choisie par défaut. On peut aussi intervenir sur des paramètres pris en compte dans ces calculs, comme la souplesse du personnage ou des préférences dans l'ordre des segments mis en jeu pour résoudre une contrainte. Jusqu'à présent, nous avons focalisé nos travaux sur le développement et le test de cette méthode. Il reste maintenant à tester cette approche en conditions réelles, en biomécanique et en neurosciences.

De plus, notre approche offre des temps de calcul compatibles avec des applications interactives. Au-delà d'une simple application dans le domaine multimédia, l'interactivité permet d'envisager des protocoles d'analyse du comportement de sujets réels en situation de coopération ou de confrontation avec des entités simulées. Toutefois, notre module ne tient actuellement pas compte de toutes les lois mécaniques. Il est relativement aisé d'effectuer des calculs de dynamique inverse à partir des trajectoires produites. Le calcul du mouvement ne se fonde cependant pas sur ce type d'information, contrairement à certaines approches proposées en biomécanique [Yeadon 90]. Cependant, la prise en compte de la dynamique dans le processus de simulation ne garantit pas de produire des mouvements naturels. Dans un grand nombre de cas, il n'est pas essentiel de tenir compte de ces aspects dynamiques, spécialement lorsqu'on modifie légèrement des données capturées qui, intrinsèquement, répondent aux lois de la mécanique. Pour bénéficier des avantages des deux approches (simulation dynamique et adaptation de mouvements capturés), il pourrait être intéressant de tester le couplage des deux : *MKM* pourrait proposer une sorte de consigne qu'un système dynamique pourrait tenter de suivre. Cette philosophie a déjà été évoquée par Yamane et Nakamura [Yamane 03] qui proposent des filtres dynamiques appliqués sur des trajectoires cinématiques. D'autres chercheurs ont aussi proposé de corriger les mouvements obtenus à partir de données capturées en vérifiant des lois spécifiques de la mécanique comme le respect de la gravité en phase aérienne [Pollard 00]. Il serait intéressant à l'avenir de fusionner de manière plus générique ces deux approches.

Une partie des travaux présentés ci-dessus a donné lieu à un dépôt APP sous la dénomination "*MKM* : Manageable Kinematics Motions". A partir de *MKM*, il est possible de définir des modèles de mouvements capables de s'adapter à l'environnement en respectant au mieux le style contenu dans le fichier d'origine. Nous avons proposé ainsi un modèle de locomotion paramétrable en vitesse et orientation ou en imposant des empreintes. Cette approche permet de mettre en œuvre de manière systématique un lien entre les analyses bio-

mécaniques et leur prise en compte dans un modèle cinématique (les hypothèses pouvant, par exemple, piloter les contraintes en fonction de paramètres de haut niveau). Pour aider à la conception de ces modèles, nous avons développé un outil de définition de modèles appelé "S4D Maker" pour lequel on peut paramétrer un certain nombre des contraintes nécessaires.

L'une des applications de ces travaux est l'animation d'humains virtuels dans des applications interactives. Pour la production d'animations précalculées (élaboration de films de synthèse), il est possible d'utiliser d'autres approches qui prennent plus de temps de calcul pour intégrer, par exemple, des simulations dynamiques. Des utilitaires commerciaux ont été développés pour effectuer ce type d'opération et assurer la cohérence avec des trajectoires capturées (par exemple, Endorphin de chez Natural Motion ou les produits de la société Havok). Pour ce type d'application, notre approche est plutôt destinée à animer des personnages secondaires ou des foules pour lesquels on souhaite obtenir des résultats rapidement et de manière intuitive.

D'ailleurs, ce type d'approche est adaptée à des environnements simulés dans lesquels on souhaite, par exemple, tester un aménagement de quartier ou de bâtiment. Une application développée au sein du projet SIAMES, en collaboration avec l'AREP concerne d'ailleurs la simulation du comportement des usagers à l'intérieur de gares pour améliorer la qualité de services [Paris 06]. Des humanoïdes sont générés dans la gare et sont pilotés par un modèle qui essaie de reproduire le comportement d'usagers réels. Il est alors important de pouvoir visualiser le déplacement de personnages ayant des morphologies différentes et capables de s'adapter aux différentes parties de la gare, comme les escaliers, les guichets, monter et descendre des trains. . Comme un grand nombre de personnages doivent être animés en même temps dans ces conditions, notre approche offre des fonctionnalités tout à fait intéressantes et permettant une visualisation en temps interactif. Toutefois, entre le modèle comportemental et *MMK*, il est nécessaire de concevoir une couche qui puisse gérer le passage d'ordres de haut niveau vers une adaptation de mouvements capturés et réciproquement.

Dans le projet RIAM AVA MOTION, en partenariat avec les sociétés Kineo et Dæsign, nous avons proposé d'utiliser un planificateur pour gérer ce lien. Toutefois, ceci est limité aux déplacements de l'humain virtuel mais ne permet pas de traiter d'autres tâches complexes. A l'avenir, nous comptons donc proposer des travaux en commun avec les chercheurs en animation comportementale.

Ce module peut évidemment être amélioré ou enrichi sur de nombreux points. Comme nous l'avons déjà évoqué, une meilleure prise en compte des lois de la physique pourrait être souhaitable pour des mouvements impliquant de grandes vitesses et accélérations. Le challenge est de pouvoir conserver des coûts de calcul très faibles tout en assurant que les mouvements générés soient crédibles d'un point de vue mécanique. Sans proposer un réel couplage entre simulation dynamique et cinématique, les approches proposées récemment par [Arikan 05, Zordan 05, Komura 05] semblent offrir un bon compromis mais nécessitent une recherche coûteuse dans une base de données. De plus, soit un modèle physique complet et, donc, coûteux, est requis, soit les méthodes reposent sur un système simplifié qui impose ensuite une résolution de type cinématique inverse avec Jacobien. Une collaboration est en cours de constitution avec le professeur Taku Komura du City University d'Hong-Kong pour voir comment combiner ce dernier type d'approche (à base de modèles

simplifiés) à la notre.

Dans le domaine de la capture de mouvements, nous avons participé à deux projets conduisant à des systèmes fondés sur les modèles de simulation. Le projet RNTL "Mouvement", en collaboration avec le CEA LETI, Infogrames et la société RealViz, s'est intéressé à fusionner des données provenant de capteurs différents (accéléromètres, magnétomètres et vidéos) en se basant sur les connaissances d'un modèle cinématique connu à l'avance. Le projet RIAM SEMOCAP, en collaboration avec les sociétés Artefacto (domaine multimédia) et ASICA (domaine électronique) et le projet MOVI (analyses vidéos) de l'INRIA Rhône-Alpes, avait pour objectif de concevoir un système uniquement fondé sur des vidéos et des modèles afin de capturer des mouvements. Les résultats préliminaires montrent que c'est une approche prometteuse.

De tels systèmes de capture associés à des méthodes de simulation pour adapter le mouvement à de nouvelles conditions offrent des outils très pertinents pour l'analyse et l'optimisation de la performance motrice dans le domaine sportif et en rééducation. Dans ces deux domaines, on peut identifier une problématique commune qui consiste à dresser un bilan de la performance motrice d'un sujet dans des conditions standardisées, de proposer des méthodes d'entraînement ou de rééducation. On peut ensuite mesurer l'effet de l'entraînement ou de la rééducation sur la performance du sujet. Nous avons mené à bien ce type de travaux pour des applications en handball (projet Ministère des Sports en collaboration avec la Fédération Française de Handball), en gymnastique (projet Ministère des Sports en collaboration avec la Fédération Française de Gymnastique) et en football (projet de la Direction Départementale et Régionale Jeunesse et Sports en collaboration avec le Conseiller Technique Régional de la Fédération Française de Football). Dans le domaine de la santé, nous menons actuellement deux thèses dont l'une effectuée par un cadre de l'école de Masso-kinésithérapie pour mieux comprendre la pathologie des hémiplegiques et ainsi aider au diagnostic. Toujours dans le domaine du handicap, un projet CNRS ROBEA (projet HUGEx) et un projet financé par le Conseil Régional (projet SIGNE) [Heloir 06b, Rezzoug 06] s'intéressent à analyser, modéliser et simuler les gestes de la langue des signes française. Ces projets s'effectuent en collaboration avec le VALORIA (co-encadrement de la thèse d'Alexis Héloir), le LESP (laboratoire de biomécanique de l'Université de Toulon) et le LiNC (laboratoire travaillant sur les acteurs communicant, de l'IUT de Montreuil).

Au-delà du simple constat, la simulation permet d'envisager une approche cherchant à optimiser numériquement la performance. Ainsi, on peut modifier un paramètre du geste et simuler son effet sur la performance globale. On peut même imaginer laisser le système optimiser les paramètres jusqu'à obtenir le meilleur score à une fonction de coût représentant une tâche à réaliser. Toutefois, ce genre d'approche nécessite de valider les résultats de simulation par la mesure. Dans l'approche que nous avons proposée, nous avons initié cette validation en comparant les mouvements simulés à ceux issus de données expérimentales. L'un des problèmes connexes est de valider les diverses hypothèses qui nous servent à sélectionner une posture parmi l'ensemble de celles qui vérifient les contraintes. L'une de ces hypothèses est que si on reste au voisinage d'un mouvement capturé, le mouvement résultant doit être réaliste. Même cette hypothèse pourrait être remise en cause car les trajectoires valables pour un sujet ne sont peut-être pas valides pour un autre sujet ayant des caractéristiques (d'entraînement, de pathologie, d'âge...) différentes. A l'avenir, nous allons donc renforcer le lien entre l'analyse et la simulation du mouvement. La plate-forme

que nous avons développée offre une base pertinente pour mener à bien ce couplage, en offrant la possibilité de tester un grand nombre d'hypothèses. Toutefois, cette approche n'est pas pertinente pour tout type de problème. C'est le cas de l'étude que nous présentons au chapitre 5 qui a nécessité d'envisager une approche très différente. Elle concerne la recherche de locomotions probables pour différentes créatures bipèdes sans se baser sur un mouvement connu à l'avance.

Ce problème de validation implique plusieurs types de travaux. Comme nous l'avons déjà évoqué, il est possible de comparer le résultat des simulations à des données expérimentales. Cependant, la comparaison de mouvements reste à l'heure actuelle un problème difficile. Le problème majeur est que le mouvement humain implique un espace multidimensionnel en raison du grand nombre de degrés de liberté mis en jeu. Comparer deux mouvements avec cette méthode peut entraîner des erreurs d'interprétation : une différence importante sur une courte durée et sur un unique degré de liberté est noyée dans un calcul de moyenne qui indique que les mouvements sont identiques alors que, visuellement, la conclusion pourrait être différente. Dans le chapitre suivant, nous présentons une approche originale pouvant être utilisée pour répondre en partie à cette question en utilisant la réalité virtuelle.

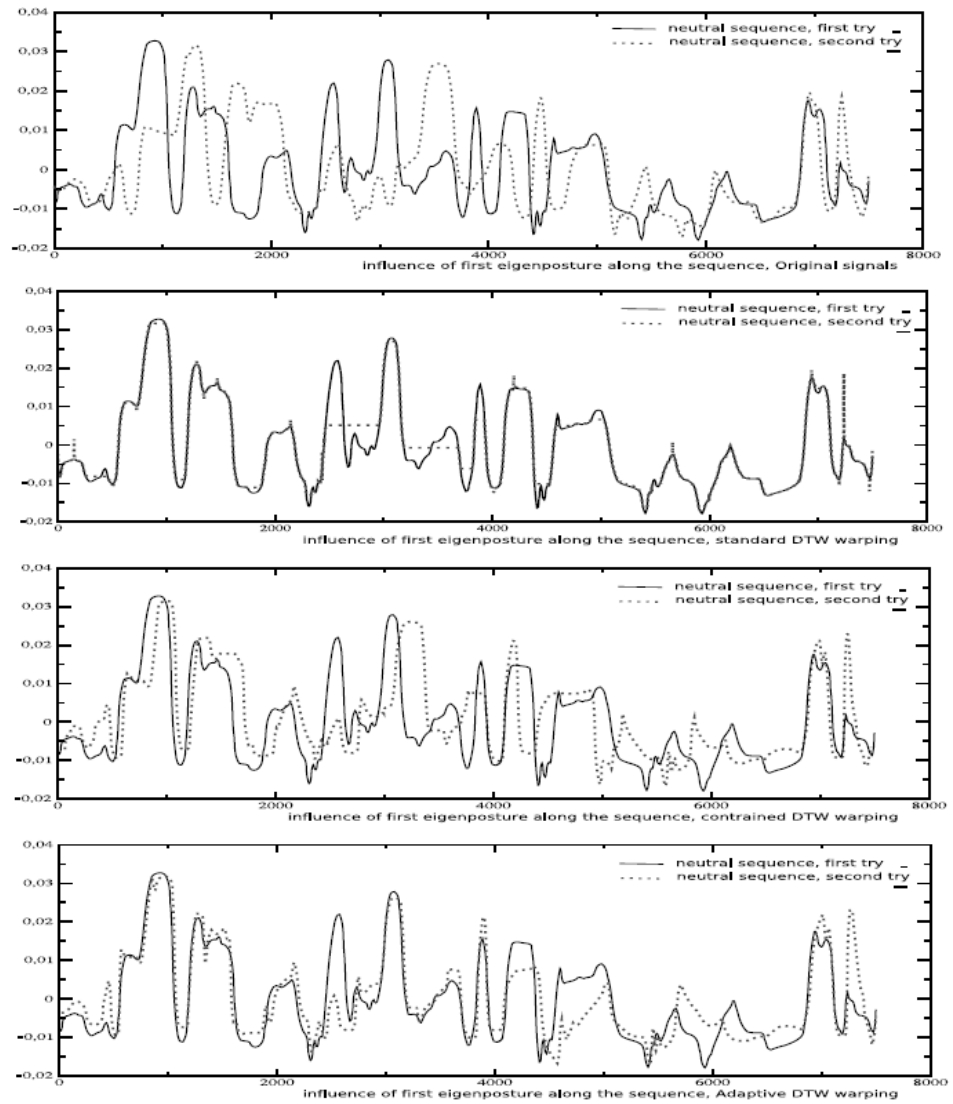


FIG. 3.21 – Comparaison de trois méthodes de DTW appliquées à deux réalisations d’une même séquence gestuelle. 2^{me} ligne : DTW classique. 3^{me} ligne : DTW contraint. Dernière ligne : notre approche.

Chapitre 4

Réalité virtuelle pour la validation des animations calculées

Comme nous l'avons vu, calculer des mouvements naturels est l'un des challenges de la simulation d'humains virtuels. Il est très difficile d'identifier ce qui caractérise l'aspect naturel du mouvement. Est-ce un problème de physique, de loi générique des sciences du mouvement (biomécanique, neurosciences...) ou d'autres critères encore ? Les mouvements simulés peuvent être comparés à des données expérimentales pour valider les modèles et les hypothèses. Cependant, définir une métrique pertinente pour le calcul de distance entre mouvements est un problème difficile. Comme nous l'avons vu, une métrique peut conduire à des comparaisons erronées, ce qui ne permet pas de valider formellement les mouvements simulés. L'être humain possède de manière inconsciente cette faculté de comparaison entre mouvements. En effet, les expérimentations de Johansson [Johansson 73] ont montré que des sujets pouvaient reconnaître différents styles dans le mouvement, simplement à partir de l'animation de quelques points. Il est ainsi possible de différencier des hommes, des femmes et même de reconnaître la démarche d'amis ou de personnes de la famille. Actuellement, les techniques de comparaison de mouvements n'ont pas cette précision, à moins de définir des outils spécifiques au critère recherché.

Pour valider un mouvement, il nous a donc paru naturel de nous tourner vers cette faculté humaine pour contourner la difficulté de définir une métrique fonctionnant pour tout type de mouvement. Benoit Bideau a effectué sa thèse sur ce sujet en se focalisant sur un cas d'étude impliquant un duel entre deux acteurs. L'idée est de savoir si les mouvements calculés d'un acteur sont perçus comme naturels par une personne réelle. Ce protocole, représenté sur la figure 2.1, correspond à la confrontation entre données simulées et données expérimentales.

4.1 Problématique

En simulation, peu d'auteurs se sont réellement intéressés à l'évaluation du réalisme des mouvements calculés. Reitsma et Pollard [Reitsma 03] ont demandé à des sujets de retrouver des sauts artificiellement modifiés parmi un ensemble de mouvements animés. Ils ont montré qu'une modification sur la composante horizontale de la vitesse était plus facilement perçue que sur la composante verticale. De même, une augmentation de la gravité était plus vite détectée qu'une diminution. Récemment, Safonova et Hodgins [Safonova 05] ont d'ailleurs montré quelles devaient être les contraintes mécaniques à respecter lorsque l'on mélange plusieurs mouvements et, particulièrement, des sauts. Cependant, ces résultats ne traitent que du réalisme physique alors que bien d'autres phénomènes rentrent en ligne de compte. Entre autre, il existe des variabilités naturelles dans les mouvements cycliques qu'il est difficile de reproduire avec des modèles. Une étude [Bodenheimer 99] a ajouté différentes sortes de bruits à des mouvements de locomotion. Des sujets étaient interrogés pour juger du réalisme des animations résultantes. Cette étude montre que certains types de bruit permettent d'atteindre un niveau de réalisme supérieur à ce qu'engendrent des mouvements parfaitement cycliques.

Cependant, d'autres paramètres influencent notre perception d'une scène animée. Sans chercher à dresser un inventaire exhaustif des recherches réalisées à ce sujet, on peut citer les travaux d'Hodgins et coll. [Hodgins 97a]. Ils ont montré que le modèle géométrique du personnage jouait un rôle dans la perception qu'ont des observateurs de ses mouvements. Ainsi, pour juger du réalisme des mouvements simulés, il faut aussi considérer toute la chaîne de calcul, incluant les algorithmes de rendu de l'image. Il faut aussi prendre en compte le support sur lequel est projeté l'image ainsi que la manière dont le sujet est amené à participer à l'étude. En réalité virtuelle, ce problème est particulièrement important puisque des sujets réels sont supposés interagir avec les entités virtuelles. Ce problème est formalisé sous le terme de "présence" en réalité virtuelle. Nous montrons dans ce chapitre que les recherches menées à propos de la "présence" peuvent apporter des éléments de réponse au problème de l'évaluation du réalisme d'un mouvement simulé.

4.1.1 La présence en environnement virtuel

La présence définit le comportement psychologique d'un individu immergé en réalité virtuelle. L'immersion peut être caractérisée comme une technologie d'interfaçage entre l'homme et l'ordinateur [Cadoz 94]. L'immersion a donc pour objet de placer un individu dans un monde virtuel à l'aide d'informations sensorielles. Comme le souligne Slater et coll. [Slater 93, Slater 94], la présence est le sentiment psychologique d'être dans l'environnement dont la base technologique est l'immersion. Il est important de noter qu'une immersion identique n'induit pas un même niveau de présence pour chaque individu [Vianin 99]. La présence peut se décliner de différentes manières suivant les auteurs. Ainsi certains parlent de présence virtuelle qui se définit comme l'état subjectif de conscience dans un environnement non-présent [Barfield 93].

La sensation de présence est liée à différents facteurs d'après Slater et Usoh [Slater 93] : les facteurs externes liés à la technologie et les facteurs internes liés aux aspects psychologiques. Les facteurs internes sont la manière d'intérioriser les expériences d'un individu.

Les facteurs externes correspondent, quant à eux, aux types de technologie et de matériel utilisés pour rendre l'environnement virtuel. Ils sont donc en rapport avec des indices perceptuels.

Facteurs internes

Ces facteurs sont très variables d'un individu à un autre. D'un point de vue graphique, comme nous l'avons vu, Hodgins [Hodgins 97a] a montré l'influence du modèle géométrique utilisé pour le rendu 3D sur la perception. Toutefois, il persiste de fortes différences inter-individuelles dans les perceptions des sujets, ce qui rejoint les résultats de Psotka [Psotka 95]. Il montre que les différences inter-individuelles de présence sont importantes lorsque l'on place des sujets dans un environnement virtuel. Les aspects technologiques ne sont pas forcément les plus cruciaux. Ainsi, si on place des sujets dans un environnement graphique de faible qualité, leurs réactions dépendent de leur imagination. Le niveau de présence dépend donc du niveau d'implication et du vécu de chaque individu. L'expérience en virtuel dépend donc de la capacité des personnes à utiliser voir compléter l'environnement de synthèse par sa propre représentation du monde. Dans la conception d'un système visant à évaluer la qualité des animations produites, il faut donc prévoir une bonne qualité de rendu afin de s'abstraire de ce biais et limiter l'influence du vécu des individus sur les résultats.

Facteurs externes

Ces facteurs peuvent se décliner en différents points [Steuer 92] :

- Les informations visuelles doivent être de très bonne qualité de manière à ce que l'individu oublie l'existence de dispositifs techniques ou d'affichage. Ceci implique que la technologie soit capable de produire un environnement médiatisé "sensoriellement riche". Cependant les informations sensorielles prélevées par l'homme dans le réel sont plus vastes que le simple aspect visuel mais intéressent aussi les autres sens. Toutefois, si on veut uniquement juger de la qualité de l'animation d'un personnage, il ne semble pas pertinent d'ajouter d'autres sens qui pourraient être mal rendus et interférer avec la tâche à analyser.
- L'environnement présenté aux participants doit être consistant, cohérent à travers tous ces affichages. Par exemple, si un sujet sort du champ de vision par la droite, il ne doit pas apparaître à l'instant suivant dans la zone de gauche.
- L'interaction du sujet avec l'environnement de synthèse est très importante. Le sujet doit être plongé dans un monde en mouvement proche du monde réel.
- De même, dans la mesure où le personnage réel est représenté dans le monde virtuel, sa représentation dans l'environnement virtuel doit avoir l'apparence la plus similaire possible à son apparence réelle. Dans l'objectif d'analyser les perceptions du sujet, il faut donc éviter de représenter son avatar afin de limiter ce problème.
- La réponse visuelle des actions du personnage réel dans le monde virtuel doit se faire de manière très rapide. Le temps de latence doit être diminué pour tendre vers zéro. Ainsi, si le personnage se déplace, il doit y avoir un recalcul quasiment instantané du point de vue et de la projection de la scène 3D.

Les mesures du degré de présence

La mesure de la présence est très complexe puisqu'elle résulte d'un ensemble de paramètres difficilement maîtrisables. Il existe des indicateurs physiologiques [Barfield 93] qui sont fonction de la tension musculaire, des réponses oculaires et cardiovasculaires face aux événements virtuels. On peut aussi définir des indicateurs liés à la réalisation d'une ou plusieurs tâches [Slater 95] dans le monde synthétique, c'est-à-dire à la précision des mouvements et à la rapidité de réponse. Un autre indicateur objectif concerne le degré de désorientation qui correspond au temps mis par le sujet pour ré-émerger dans le réel.

D'autres mesures, plus subjectives, correspondent à une évaluation psychologique généralement réalisée à l'aide de questionnaires [Witmer 98, Slater 99, Usoh 00]. Vu la nature intrinsèque et complexe de la présence il ne paraît pas évident de valider des mesures subjectives. Il nous semble donc nécessaire d'associer les questionnaires à un autre type d'évaluation. Ainsi, pour juger du réalisme d'une animation, nous pouvons à la fois interroger le sujet avec des questionnaires inspirés de ceux publiés pour la "présence" et placer le sujet dans une situation où il doit effectuer une tâche en fonction du mouvement qu'il perçoit.

4.1.2 Définition du cas d'étude

Afin de mettre en place un protocole d'évaluation des animations s'inspirant des travaux sur la "présence", il faut donc :

- proposer un questionnaire pour que le sujet puisse qualifier son expérience face au mouvement simulé,
- impliquer le sujet dans une tâche nécessitant une réaction à l'animation perçue,
- tendre vers un rendu visuel correct afin de limiter les problèmes liés au vécu du sujet,
- se focaliser sur les effets visuels et éliminer tout autre sens pour ne juger que de la pertinence de l'animation et non de la manière dont on aurait sonorisé la scène ou appliqué un retour d'effort sur le sujet.

Le duel entre un gardien de but et un tireur se prête donc bien à ce type d'exercice. D'autres duels avaient été simulés en environnement virtuel par le passé, comme le tennis [Noser 96, Molet 96, T.K.Capin 97]. Cependant, ces expérimentations n'avaient pas pour objectif d'évaluer le degré de réalisme des animations produites et les interactions s'effectuaient via des métaphores gestuelles mesurées par un système temps réel de capture de mouvements. En football, des études ont été menées auprès de gardiens pour analyser leur perception face à différentes formes de types de tirs [Craig 06]. Ces travaux se focalisent sur la trajectoire de balle et n'ont donc pas pour vocation de valider un modèle de simulation de mouvements d'un personnage.

Afin de limiter la place nécessaire, nous avons choisi le handball pour lequel nous disposons d'une très grande base de données. En collaboration avec la Fédération Française de Handball et grâce à un financement du ministère des sports, nous avons donc pu mettre en place ce type d'expérimentation et recruter des sujets ayant différents niveaux de pratique. Nous détaillons maintenant ce qui caractérise cette situation afin de mieux choisir les paramètres à simuler et à étudier.

L'analyse des informations prélevées par le gardien nécessite une connaissance de l'organisation gestuelle du tireur. Plusieurs études sur la gestuelle du tireur au handball nous

permettent d'identifier des critères pouvant apporter de l'information aux gardiens pour anticiper la trajectoire de la balle avant le lâcher [Joris 85, Chaigneau 92]. Ces études mettent en avant l'importance de la rotation de l'humérus au cours du mouvement et de la main (dont le mouvement interviendrait pour 30% dans la vitesse finale de balle). Witt et coll. [Wit 98] ont montré que la vitesse de balle est la résultante d'une transmission de quantité de mouvements entre le bassin et le tronc, puis entre le tronc et l'avant bras. Ces études fournissant un aperçu incomplet et parcellaire du mouvement global, nous avons mené notre propre étude qui a permis de caractériser complètement ce mouvement [Fradet 04] et, par la même de compléter notre base de données numérique de gestes.

Contraintes liées au duel gardien tireur en handball

La tâche première d'un gardien de handball est de se trouver sur la trajectoire du ballon pour l'intercepter. Cependant, le temps imparti au gardien pour atteindre sa cible est très réduit vu les vitesses de ballon pouvant dépasser les 100Km.h^{-1} . Le gardien est donc amené à anticiper la trajectoire de la balle avant que celle-ci ne soit lâchée par le tireur. En effet, l'étude de Cottin [Cottin 89] menée sur 3 sujets de niveau international montre que la mise en action de propulsion des segments corporels vers le ballon se réalise quand ce dernier a effectué le premier tiers de la durée totale de sa trajectoire. Le temps de réaction global du gardien était défini par un abaissement du centre de gravité du corps sans déplacement latéral. Cette réaction du gardien se produisait en moyenne quarante trois millisecondes avant le lâcher du ballon. Cependant, comme le précise Cottin, cet indice ne permet pas de définir la parade réalisée mais peut être vu comme un ajustement postural qui concrétise la préparation à court terme. Cette étude confirme toutefois que le gardien de but prépare donc son action avant le lâcher du ballon. Cette préparation a ensuite été décomposée par Alain et Sarrazin [Alain 90] en trois formes :

- la préparation neutre où le gardien ne détermine pas à l'avance une préparation en faveur d'un élément particulier,
- la préparation partielle où le gardien se prépare à plusieurs réponses en préparant une plus que l'autre,
- la préparation totale où le joueur détermine à l'avance la réponse qu'il va produire lors de l'apparition du signal.

La prise d'informations des gardiens de but en handball a donc été étudiée dans la littérature soulignant que les gardiens de handball prélèvent des indices sur l'organisation segmentaire du joueur [Keller 87]. En complément de ces travaux, Derrider [Derrider 85] utilise une technique vidéo pour montrer qu'en situation de pénalty, l'attention du gardien se porterait principalement sur le bras porteur du ballon. Ces deux informations influencent donc visiblement le gardien dans le choix de sa parade. Ainsi, si l'opposant est synthétique et correctement animé en 3D, il doit provoquer le même type de comportement chez les gardiens de but.

4.2 Protocole de test utilisant la réalité virtuelle

Comme nous l'avons déjà souligné, l'environnement et les mouvements des personnages de synthèse doivent être les plus fidèles possibles à la réalité pour limiter les biais

liés à l'expérience des sujets à des environnements simulés. L'objectif est de pouvoir les laisser réaliser leur activité le plus naturellement possible. Cette dimension psychologique se retrouve d'ailleurs dans la notion de présence. Comme nous l'avons proposé, on peut alors évaluer le réalisme de la scène proposée au sujet via un questionnaire couplé à une comparaison de sa gestuelle avec celle qu'il adopte en conditions réelles de jeu.

Ainsi, dans un premier temps, nous avons comparé les gestes produits par le sujet face à des tirs réels et face aux même tirs simulés sur des joueurs synthétiques en environnement virtuel. Le joueur a des dimensions différentes de celles du tireur d'origine, ce qui permet de vérifier la pertinence de nos algorithmes d'adaptation du mouvement présenté au chapitre précédent. Pour étudier le niveau de présence des sujets lors de cette expérimentation (et ainsi le réalisme de l'animation calculée), nous organisons l'étude de la manière suivante (figure 4.1) :

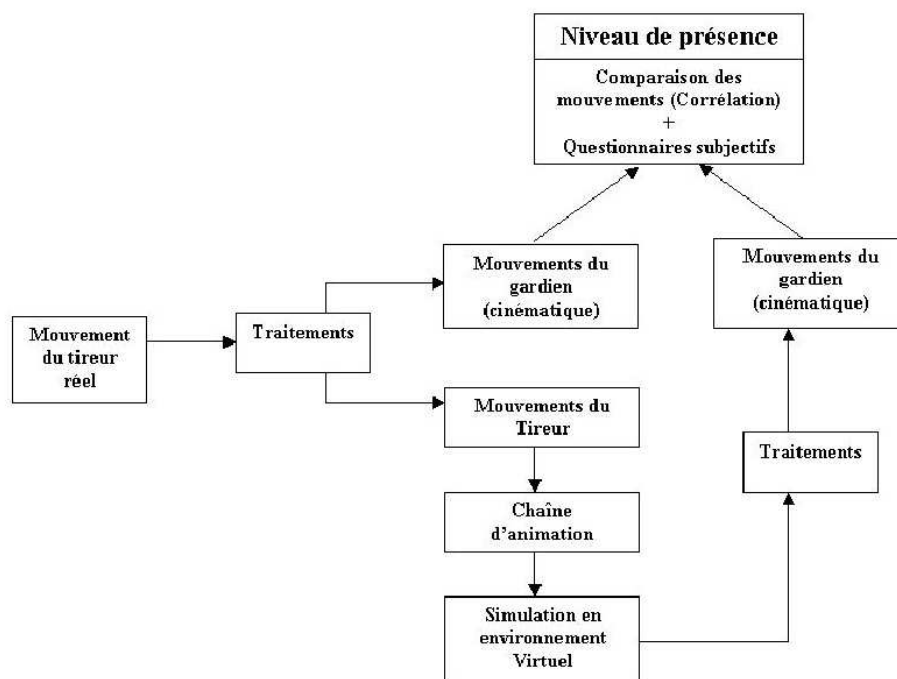


FIG. 4.1 – Organisation de l'expérimentation menée en réalité virtuelle avec un gardien de but réel, impliquant des mesures en condition réelle et des évaluations des mouvements exécutés en environnement simulé.

1. Dans un premier temps nous obtenons la cinématique du tireur et du gardien dans la même phase de jeu par capture de mouvements.
2. Ces informations sont ensuite traitées de manière à pouvoir être analysées dans le cas du gardien, ou à être intégrées dans une chaîne d'animation dans le cas du tireur.

3. La cinématique du gardien est ensuite obtenue lors de sa confrontation au tireur animé en images de synthèse, dans un environnement virtuel.
4. Cette cinématique est ensuite traitée de manière à être comparée à celle de ce même gardien dans l'environnement réel.
5. La comparaison des mouvements des gardiens dans les deux environnements nous donne un indicateur du niveau de présence.

Nous détaillons maintenant quelques uns de ces points.

4.2.1 Expérimentation dans l'environnement réel

Cette première partie de l'étude a pour objectif de caractériser le mouvement du gardien en réponse à une situation de tir donnée. Pour caractériser la gestuelle du gardien en fonction d'une action de tir, nous avons choisi de réaliser une acquisition de mouvements. Ceci implique donc de capturer à la fois les mouvements du tireur et du gardien pendant une phase de jeu. Celle-ci est reproduite en dehors d'un match, sans autre joueur.

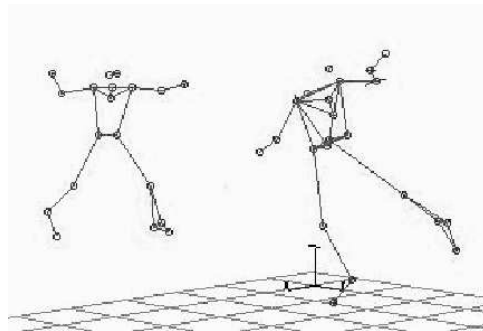


FIG. 4.2 – Capture de mouvements des deux joueurs évoluant en situation réelle (gardien à gauche, tireur à droite).

Les gardiens devaient simplement parer différents tirs effectués par des joueurs de même niveau de pratique. Les attaquants réalisaient alors un enchaînement composé d'une première phase de course et d'une seconde phase de tir. Les tirs étaient répertoriés en trois catégories :

- Tirs à 6 mètres en appui,
- Tirs à 9 mètres en appui,
- Tirs à 9 mètres en suspension,

Chaque tireur réalisait 4 essais pour les différentes catégories, soit un total de douze tirs.

Le mouvement du tireur est acquis dans l'objectif unique d'animer un personnage pour l'expérimentation en environnement virtuel. Les mesures effectuées sur le gardien permettent de mettre en relation un tir et des trajectoires de parade de ce dernier. Nous étudions particulièrement les paramètres suivants :

La trajectoire du centre de masse : La trajectoire du centre de masse global des gardiens doit nous permettre d'observer l'organisation générale de ceux-ci lors de leur parade.

La décomposition de cette donnée suivant les différents axes est aussi un élément important pour quantifier le mouvement du gardien. De plus, la détermination du centre de masse permet de définir le référentiel barycentrique. La définition de ce référentiel est importante puisque c'est dans ce repère que nous étudions les mouvements des différents segments.

Les trajectoires des centres de masses locaux des différents segments : L'étude de ce paramètre doit nous permettre de définir les segments préférentiellement utilisés lors de la parade. Pour comparer le déplacement de ces centres de masse locaux d'un gardien à un autre, il est nécessaire de les analyser dans le référentiel barycentrique.

Les vitesses et accélérations des centres de masses locaux : Les données de vitesse et accélération des centres de masses locaux doivent permettre de définir le début de la parade du gardien.

4.2.2 Animation du tireur virtuel

Une fois les données réelles acquises, nous utilisons la chaîne d'animation présentée dans le chapitre précédent pour animer les mouvements d'un tireur virtuel. Les modules d'animation sont embarqués dans la plate-forme logicielle OpenMask¹ de manière à obtenir un rendu visuel 3D temps réel dans l'environnement virtuel. Le personnage synthétique est le même, quel que soit le tir capturé. Ceci implique que les trajectoires sont adaptées en mettant à l'échelle, pour chaque mouvement, la représentation indépendante de la morphologie utilisée par MKM. Nous avons enregistré un mouvement de course séparément du mouvement de tir que nous combinons pour obtenir une séquence complète de course d'élan et de tir, comme le montre la figure 4.3. Ainsi, nous pouvons tester le résultat d'une méthode d'adaptation et de mélange de mouvements sur les gestes du gardien.

Le ballon est animé par un modèle physique très simple qui ne gère pas les rotations et les effets de type Magnus. Cette simplification est acceptable vu la faible distance qui sépare le tireur du but (entre 6 et 9 mètres) et les vitesses mises en jeu. De plus, comme l'indique la littérature, le sujet doit logiquement anticiper la trajectoire du ballon et prendre des informations avant que ce dernier ait quitté la main du tireur.

La figure 4.4 montre une séquence de tir à laquelle les sujets ont été soumis.

4.2.3 Expérimentation en environnement virtuel

Le support sur lequel sont jouées ces animations peut avoir une influence sur l'implication du gardien, comme cela a été montré dans les précédentes études sur la "présence". Pour se rapprocher le plus possible des conditions réelles, nous avons utilisé une salle immersive. Ce système est composé d'une SGI Onyx2 InfiniteReality dont les sorties vidéo sont redirigées vers trois vidéo projecteurs Barco 1208S synchronisés. L'image était projetée sur un écran semi-cylindrique avec un rayon de 3,80m, une taille de 2.38m et un champ visuel de 135°. La vision tridimensionnelle est obtenue à l'aide de lunettes stéréoscopiques à 60 Hertz (30 Hertz pour l'œil droit et 30 Hertz pour l'œil gauche). Pour obtenir un comportement naturel du gardien, nous avons reconstruit un environnement aussi réaliste que

¹OpenMask : plate-forme logicielle développée par l'INRIA pour la simulation en environnement virtuel, <http://www.irisa.fr/siames/OpenMASK/>

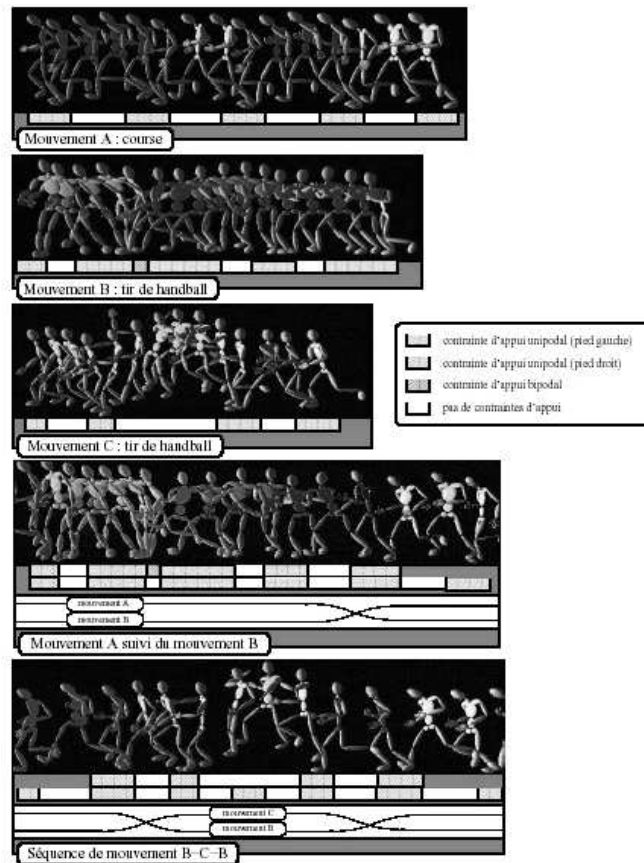


FIG. 4.3 – Différents mélanges possibles pour trois mouvements : course (1^{ère} ligne), tir en restant en appui (2^{ème} ligne) sur le sol et tir incluant un saut (3^{ème} ligne).

possible en reproduisant les repères visuels bien connus du joueur. Un des repères les plus importants était le but qui était physiquement placé au centre de la salle de réalité virtuelle. L'environnement virtuel doit être représenté à l'échelle 1, ce qui a nécessité un protocole particulier de paramétrage de la caméra virtuelle placée dans la scène. Avec ce type de matériel, on se rapproche de conditions réelles de jeu bien que l'environnement soit simulé.

Nous avons utilisé une nouvelle fois le système de capture du mouvement composé de 7 caméras pour mesurer la gestuelle du gardien. Une fois les caméras placées autour de la surface de jeu et la calibration entre les deux environnements réalisée, nous avons proposé le protocole suivant :

- une première étape de familiarisation avec l'environnement qui permet aux gardiens de s'habituer, entre autre, au port des lunettes 3D.
- une validation de l'outil de réalité virtuelle pendant laquelle les gardiens doivent parer un ensemble de tirs qu'ils ont déjà rencontrés en réel lors de la première ex-



FIG. 4.4 – Copies d'écran d'un tir en suspension soumis aux sujets de l'expérimentation sur le duel tireur-gardien.

périmentation. Dans cette phase, les gardiens doivent juste essayer de parer les tirs virtuels qui leur sont proposés : vingt quatre tirs qui ont été choisis de manière aléatoire parmi l'ensemble des tirs capturés lors de la première expérimentation. Tous les tirs ci-dessus sont joués deux fois, mélangés aux autres essais.

- une confrontation à des tirs nouveaux obtenus en modifiant légèrement ceux utilisés pour la phase précédente : élévation de la position du poignet de 10cm au moment du lâcher, décalage de l'instant de lâcher du ballon et accentuation de la rotation de la ligne des épaules.

Après avoir réalisé ce protocole, les sujets répondent à un questionnaire inspiré de celui proposé par Slater [Slater 99]. Parmi la multitude de questions proposées par cet auteur, nous en avons sélectionnées dix qui nous semblent appropriées à notre étude. Notre questionnaire était donc composé des phrases suivantes :

1. Votre interaction avec l'environnement vous a-t-elle semblée naturelle ?
2. L'aspect visuel vous a-t-il encouragé à participer au jeu ?
3. Trouvez-vous que les objets en mouvements dans l'espace affectaient vos sens (ballon, tireur) ?
4. Votre expérience dans le monde virtuel est-elle proche de celle vécue dans le monde réel ?
5. Pouviez-vous complètement examiner l'environnement en utilisant la vision ?
6. Pouviez-vous examiner de manière précise les objets ?
7. Etiez-vous vraiment impliqué dans l'expérience virtuelle ?
8. Votre ajustement avec le monde virtuel a-t-il été rapide ?
9. Avez vous eu l'impression de vivre une vraie séance d'entraînement ou de match ?
10. La qualité graphique de l'environnement a-t-elle interféré sur la réalisation de votre tâche ?

Pour chaque question, les sujets doivent répondre à l'aide d'une échelle graduée de 1 (faible) à 7 (très bon).

4.2.4 Résultats

Résultats sur l'évaluation des mouvements du gardien

Afin de définir les variations qui peuvent exister pour plusieurs tirs considérés comme identiques dans une phase de jeu réelle, nous avons comparé la cinématique du bras de chaque gardien. Pour les mouvements de chaque gardien, en réponse à un même type de tir, nous avons calculé le coefficient de corrélation entre les différentes trajectoires. Nous observons un coefficient de corrélation moyen de 0.8 avec un écart type de 0.04 pour des valeurs allant de 0.76 à 0.85. Il est cependant important de noter qu'en situation réelle, deux tirs supposés proches ne sont pas parfaitement identiques, ce qui peut logiquement apporter une certaine variabilité des gestes du gardien. Ceci montre la difficulté de mener à bien ce type d'analyses dans des situations réelles que l'on a du mal à standardiser complètement.

Dans la phase de jeu face à un opposant virtuel, nous avons fait le même type de calcul. Cette fois, le fait de travailler sur des trajectoires simulées assure que l'on dispose bien de deux tirs identiques entre deux essais. Nous obtenons alors des corrélations entre deux mouvements (du même gardien face aux différentes situations répétées deux fois) allant de 0.97 à 0.99.

Si on regarde maintenant les corrélations entre les mouvements du gardien face à un tir capturé et face aux trois légères adaptations présentées ci-dessus, les valeurs tombent jusqu'à 0.76. Ces valeurs restent dans la gamme de celles que nous avons trouvées lors de l'expérimentation réelle. Ces résultats tendraient donc à montrer que les variations mesurées lors de ces expérimentations sont principalement dues à des modifications légères de la gestuelle du gardien. Ils confirment aussi que les gardiens déclenchent exactement les mêmes parades face à des tirs rigoureusement identiques.

Le tableau 4.1 et la figure 4.5 présentent ces résultats pour chaque individu.

Sujet	Référence	Poignet	Lâcher	Buste
1	0.98±0.01	0.8±0.02	0.91±0.01	0.94±0.01
2	0.98±0.01	0.78±0.01	0.87±0.01	0.92±0
3	0.98±0.01	0.78±0.02	0.85±0	0.92±0
4	0.97±0.01	0.79±0	0.89±0.01	0.93±0.01
5	0.98±0.02	0.77±0.01	0.89±0.01	0.92±0.02
6	0.97±0.02	0.76±0.01	0.85±0.01	0.96±0.01
7	0.97±0.02	0.82±0.01	0.9±0	0.94±0.02
8	0.96±0.02	0.86±0.02	0.9±0.01	0.93±0.01

TAB. 4.1 – Corrélations(± écart type) entre les gestuelles des gardiens face à deux fois le même tir (colonne *Référence*), lorsqu'on modifie la hauteur du poignet (colonne *Poignet*), le moment du lâcher (colonne *Lâcher*) et l'orientation du buste (colonne *Buste*) pour chaque sujet.

La figure 4.6 présente la parade du sujet 5 lorsqu'il est confronté au mouvement de référence, puis lorsqu'il est confronté à un mouvement avec modification du poignet. Cette figure confirme bien que le mouvement est légèrement différent lorsque l'on applique une modification précise au modèle.

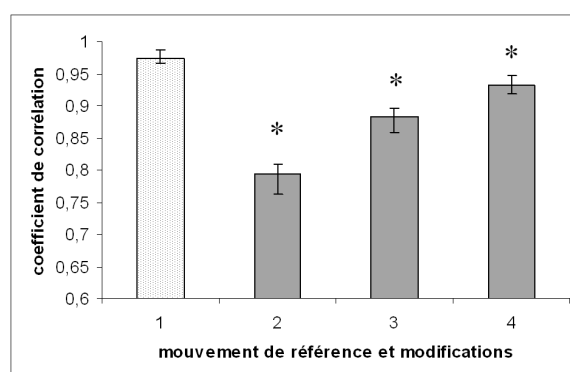


FIG. 4.5 – Corrélations moyennes (\pm écart type) entre les gestuelles des gardiens face à deux fois le même tir (colonne de gauche), lorsqu'on modifie la hauteur du poignet (2^{ème} colonne), le moment du lâcher (3^{ème} colonne) et l'orientation du buste (4^{ème} colonne). Les différences significatives ($p < 0.05$) par rapport à la 1^{ère} colonne sont indiquées par une *.

On peut constater une tendance commune à tous les sujets : la modification de la hauteur du poignet influence nettement plus les gestes du gardien. Statistiquement, nous avons pu montrer des différences significatives (test de Student pour séries appariées avec une significativité pour $p < 0.05$) pour les trois modifications, comparé à la corrélation de référence. Toutefois, ces différences restent extrêmement faibles pour le changement de rotation du torse du tireur.

Ces différences observées entre les trois situations peuvent être dues à une multitude de facteurs qui ne permettent pas de définir quelle type de modification entraîne de manière générale une modification plus importante. En effet, il faudrait pour cela pouvoir considérer qu'une rotation de 10° du tronc est comparable à une élévation de 10cm du poignet. De plus, il peut aussi y avoir des problèmes de perception dus à l'environnement de synthèse. Nous avons vu que le vécu de chaque sujet concernant la perception de visualisations synthétiques peut avoir une influence sur ce type de résultats. Cependant, lorsqu'on présente deux fois le même tir, ces différences s'atténuent ce qui tendrait à penser que les sujets peuvent être considérés égaux face à la représentation numérique du jeu. De plus amples investigations seraient nécessaires pour expliquer ces différences.

Nous pouvons toutefois retenir que ces modifications mineures dans le geste du tireur entraînent un changement dans la gestuelle du gardien. Ceci montre que le modèle d'animation est bien capable de retranscrire les éléments visuels nécessaires à la prise de décision du gardien. De plus, comme leurs gestes en réalité virtuelle sont quasiment identiques à ceux qu'ils ont effectués dans l'environnement réel, on peut supposer que ces éléments visuels sont préservés, au-delà d'avoir une simple influence sur le comportement du gardien.

Il faut souligner que les mouvements des tireurs subissent tout de même deux modifications majeures : un mélange avec une course acquise séparément et surtout une adaptation à la morphologie du personnage synthétique. Ceci tendrait donc à montrer que ces traitements n'influencent pas ou très peu la prise d'informations du gardien, ce qui validerait ces méthodes au moins dans ce cas de figure.

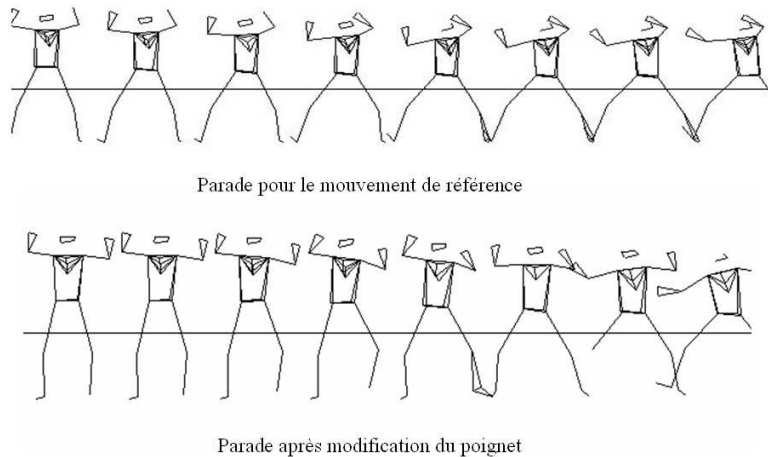


FIG. 4.6 – Mouvements du gardien face à un tireur virtuel effectuant un tir capturé (en haut) puis montant son poignet de 10cm (en bas).

Résultats du questionnaire

La figure 4.7 présente les résultats provenant du questionnaire. Nous observons des valeurs faibles pour la quatrième question avec une moyenne de 2 ± 0.8 et la neuvième question avec une moyenne de 1.75 ± 0.5 (figure 4.7). Ces questions sont directement en rapport avec le vécu des gardiens dans le réel. Les sujets ne semblent donc pas percevoir, de façon subjective, la situation virtuelle comme une situation de match où d'entraînement réel. Pour information, lorsque nous avons mené à bien l'expérimentation réelle avec un vrai tireur, les gardiens nous avaient déjà signalé qu'ils ne se sentaient pas une situation de match, sans les autres équipiers, sans l'ambiance et avec la présence du matériel de mesure. Ceci tendrait donc à montrer que la question est mal posée, surtout si on considère les résultats de l'évaluation des mouvements des gardiens dans les deux environnements.

Malgré tout, pour la première question concernant le réalisme de l'interaction, les sujets obtiennent des scores supérieurs à la moyenne 4 ± 0.8 . De même les résultats obtenus pour les questions relatives aux facteurs de distraction (sur la façon dont les objets et événements affectaient la réalisation de leur tâche), les sujets obtiennent des scores de 1.5 ± 0.6 . Les résultats de cette question doivent être interprétés comme positifs. En effet, une faible valeur indique que la qualité graphique ne leur a pas posé de problèmes pour réaliser leur parade. De plus, les réponses concernant l'ajustement et l'implication dans la situation virtuelle montrent un très bon niveau et une bonne faculté d'adaptation des sujets à l'environnement de synthèse.

L'utilisation de ce type de questionnaire est réellement problématique. En effet, la manière dont les phrases sont tournées, le vocabulaire choisi et le côté subjectif des réponses posent de sérieux problèmes d'interprétation. Pour juger du réalisme des mouvements simulés, il nous semble donc préférable de se limiter aux résultats obtenus en comparant les gestes des gardiens, même si le questionnaire permet d'avoir un retour complémentaire, consultatif.

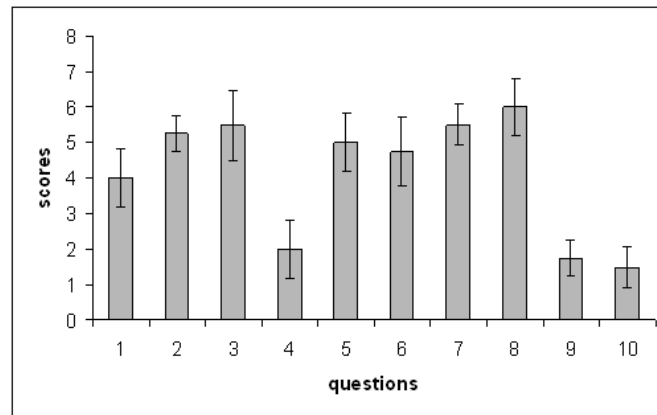


FIG. 4.7 – Réponses aux 10 questions posées aux sujets après l'expérimentation.

4.3 Conclusion et perspectives

Ce travail a été mené par Benoît Bideau [Bideau 03a] qui effectuait sa thèse à l'Université Rennes 2, en collaboration avec l'IRISA. Ce projet démontre l'intérêt de faire collaborer les différentes disciplines pour répondre à de nouvelles problématiques. Ces travaux originaux ont fait l'objet de plusieurs publications internationales dans les différents domaines concernés [Bideau 03b, Fradet 03, Bideau 04b, Bideau 04a]. Ce n'est qu'une première proposition qui soulève un grand nombre de problèmes techniques et scientifiques. Du point de vue technique, l'évaluation de la tâche réalisée par un utilisateur face à un environnement simulé reste un problème complexe. Si cette tâche est traduite par une performance motrice, il faut une nouvelle fois définir une métrique. Comme nous l'avons vu, cela reste un problème difficile si cette métrique doit être générique. Dans le cas du handball, des études spécifiques sur le geste de tir et de parade permettent d'identifier des critères pertinents de comparaison. Nous avons choisi la trajectoire du centre de masse du bras du gardien car elle a été identifiée comme pertinente dans les sciences du sport. De plus, l'utilisation du centre de masse local permet de résumer à une trajectoire le résultat de plusieurs degrés de libertés en mouvement. Les corrélations que nous avons calculées sur des trajectoires recalées dans le temps et l'espace montrent une similitude dans les déplacements. Toutefois, cette méthode a des limites dans les cas où les mouvements ne diffèrent que sur un court instant. Cette différence locale peut être lissée par la similitude présente pendant tout le reste du mouvement. A l'avenir, il nous semble nécessaire d'effectuer une synthèse des méthodes développées dans les deux domaines pour tenter de proposer une métrique ou une méthodologie plus pertinente.

En dehors de ce problème, l'existence de cet environnement permet cependant d'envisager de nouveaux protocoles expérimentaux. Ce type de recherche pourrait permettre de non seulement mieux comprendre comment concevoir des environnements virtuels crédibles mais aussi effectuer des recherches fondamentales sur la perception et le contrôle moteur. Encore une fois, ces recherches ne peuvent raisonnablement pas s'effectuer séparé-

ment dans les différents domaines puisqu'elles nécessitent les compétences de spécialistes en animation, en conception de systèmes de réalité virtuelle, en psychologie, en perception. . Il n'est en effet pas raisonnable d'effectuer ce type de recherche sans maîtriser la chaîne de production de l'animation. A l'inverse, il y aurait des biais à occulter les problèmes de perception et de présence dans l'évaluation d'animations sur des personnages synthétiques.

Dans cette idée, nous avons initié des travaux en collaboration avec Cathy Craig de Queen's University à Belfast et de Reinoud Bootsma du Laboratoire "Mouvement et Perception" de Marseille. Ensembles, nous avons mis au point un protocole permettant de mieux comprendre les perceptions des joueurs en environnement virtuel. Les expérimentations liées à ce protocole ont eu lieu au deuxième trimestre 2006 et sont actuellement en cours de dépouillement. Ces résultats devraient nous apporter des éléments nouveaux pour affiner les protocoles de validation des mouvements simulés en environnement de synthèse. Comme nous l'avons vu, il y a aussi des applications évidentes dans le domaine des neurosciences qui peut exploiter ce type de développements pour obtenir de nouvelles informations sur la perception humaine.

Depuis ces travaux, nous avons acquis le nouveau système de capture du mouvement Vicon-MX composé de 12 caméras 4-Mpixels, rapides (160Hz). Ce système permet d'effectuer des captures en temps réel. Nous avons donc développé l'environnement logiciel capable de récupérer à la volée les informations de capture du mouvement dans notre environnement de simulation. Ce travail a été réalisé de nouveau par des personnes appartenant à différentes disciplines : un ingénieur expert de l'IRISA, un maître de conférences de Rennes 2 (en plus de moi-même), un doctorant de Rennes 2 (Nicolas Vignais, encadré par Benoît Bideau) et un ingénieur expert de Rennes 2. Nous avons donc dû porter nos outils de traitement des données capturées vers une version temps réel. Nous avons aussi développé un module de détection de collision qui informe si le sujet a touché le ballon lors de la parade. Nous avons aussi mis au point une correction du point de vue en fonction du déplacement du joueur à partir de la position des marqueurs réfléchissant positionnés sur la tête du sujet.

Nous souhaitons aussi tester de nouvelles modalités pour enrichir cet outil d'évaluation. Entre autre, nous sommes en train d'insérer un système de suivi du regard qui permettrait de vérifier si les points d'intérêt (calculés à partir de la direction du regard) relevés dans l'environnement virtuel sont les mêmes que ceux obtenus en situation réelle de jeu.

L'une des étapes suivantes est de gérer le mouvement des deux équipes pour offrir aux utilisateurs une vue plus réaliste du jeu. Ce travail doit s'effectuer avec S. Donikian et F. Lamarche du projet BUNRAKU (anciennement SIAMES) de l'IRISA. Le but est de modéliser le comportement des défenseurs et des opposants qui tentent de mettre en place une stratégie d'équipe. Ce projet nécessite un grand nombre de travaux pour identifier un modèle comportemental capable de reproduire des stratégies types de jeu. Ce modèle doit certainement s'appuyer sur les capacités motrices du personnage. Ce n'est pas uniquement un problème de connexion entre les modules MKM présentés en chapitre 3 et un modèle comportemental.

En plus de l'analyse du réalisme des animations produites, les applications de ce genre de travaux sont multiples. Elles concernent en premier lieu le milieu sportif qui peut trouver dans ce type d'outils, un moyen d'évaluer et d'entraîner les joueurs. Le plus pertinent

serait de disposer d'une base de données de gestes d'un grand nombre de joueurs et permettre ainsi à des gardiens de s'entraîner face à des tireurs qu'ils doivent prochainement rencontrer. Comme le joueur virtuel est totalement sous contrôle, cela permettrait aussi d'entraîner les gardiens contre des formes différentes de tir que l'entraîneur pourrait faire varier à volonté.

Au-delà du domaine sportif, les industriels peuvent être intéressés pour tester si les scénarios développés en réalité virtuelle et impliquant des entités autonomes engendrent bien un comportement réaliste en condition de formation. Nous participons au projet RNTL Perf-RV2 "L'Humain Virtuel au travail dans l'Usine du Futur" dans lequel plusieurs scénarios de formation sont proposés. De même dans le projet "Usine Numérique" du pôle de compétitivité system@tic, des scénarios sont développés pour étudier la place de l'humain virtuel dans l'usine numérique. Ces scénarios doivent permettre de former de futurs intervenants à effectuer des tâches complexes ou dangereuses pour lesquelles des procédures précises ont été développées. Pour certains de ces scénarios, il pourrait être pertinent de proposer des protocoles de validation inspirés de ceux que nous avons proposé pour le handball.

Nous venons de voir que le processus mis en œuvre dans le chapitre 3 pouvait générer des animations suffisamment crédibles malgré les faibles temps de calcul requis. Il peut donc répondre à un grand nombre de problèmes nécessitant des animations en environnement interactif. Pour cela, il s'appuie sur une base restreinte de mouvements qu'il adapte à de nouvelles contraintes. Cependant, pour certaines applications, ce type d'approche n'est pas possible. C'est ce que nous proposons maintenant d'aborder dans le cas particulier de la locomotion bipède.

Chapitre 5

Recherche de locomotions probables pour les espèces bipèdes

Les chapitres précédents avaient pour objectif de proposer une méthodologie et une architecture logicielle générique pour animer des personnages en environnement interactif tout en laissant la possibilité de tester des hypothèses issues des sciences expérimentales. Toutefois, cette proposition généraliste ne répond pas à la totalité des problématiques que l'on cherche à résoudre pour comprendre le contrôle du mouvement humain. En effet, l'approche décrite précédemment repose sur une base de données de mouvements capturés que l'on souhaite adapter à de nouvelles contraintes. Le mouvement est la résultante de nombreuses contraintes pouvant se formaliser à la fois sur le plan cognitif et mécanique. Même si les travaux présentés dans ce document se focalisent sur les aspects mécaniques, il existe un quelques problèmes où l'utilisation de trajectoires capturées n'est pas la plus adaptée. Analyser finement le rôle de la minimisation d'énergie dans la production de mouvements peut amener à vouloir générer complètement un geste plutôt que d'en adapter un d'une base de données. En effet, on peut toujours se demander si un mouvement économique du point de vue énergétique pour un squelette donné est adaptable directement à un squelette différent. Les squelettes humains, malgré des différences de masse et de dimension, reposent sur une structure anatomique et des articulations que l'on peut considérer comme similaires. Il semble donc raisonnable de mener des adaptations uniquement géométriques sur les mouvements capturés.

Si on s'intéresse maintenant à la transposition à d'autres espèces animales, cette hypothèse n'est plus raisonnable puisqu'il existe de grosses différences morphologiques et que les articulations peuvent fonctionner différemment. Pour ce type de problème, il ne semble pas que *MKM* puisse être directement utilisé. Dans ce chapitre, nous proposons une autre approche qui peut répondre de manière plus satisfaisante à ce type de contrainte dans le cas particulier de la locomotion bipède. Ainsi, le problème pourrait être posé de la manière suivante : proposer une méthode de simulation capable de calculer des marches pour

des espèces bipèdes en fonction de données anatomiques et d'un ensemble d'hypothèses générales du contrôle moteur.

Nous nous sommes intéressés à ce type de problème suite à un contact avec G. Berillon de l'UPR CNRS 2147 "Dynamique de l'Evolution Humaine" qui souhaitait voir comment collaborer pour mettre au point une méthode de simulation de marche adaptable à différentes hypothèses de reconstruction d'hominidés fossiles. L'idée était de faire fonctionner ensembles des caractéristiques anatomiques provenant de différentes parties d'un fossile. En paléanthropologie, les scientifiques se focalisent fréquemment sur une partie isolée du squelette. Nous proposons donc ici de travailler sur un système plus complet dont on cherche à connaître le fonctionnement. Notre intérêt a donc rapidement convergé vers la recherche des liens entre structures anatomiques et mouvements. Toutefois, ces caractères morphologiques ne suffisent pas à générer une locomotion puisqu'il faut aussi prendre en compte le système de contrôle du mouvement, incluant des perceptions (cf. [Berthoz 97] pour une synthèse) et des stratégies locomotrices. Nous donnons maintenant quelques unes des très nombreuses analyses menées sur la locomotion humaine et qui ont permis de guider nos choix dans la conception d'un système original de simulation.

5.1 Revue de littérature sur la locomotion humaine

Dès la fin du 19^{ème} siècle, JE. Marey [Marey 73] a utilisé la chronophotographie pour comprendre l'organisation temporelle de la locomotion humaine. Avec l'amélioration des techniques de mesure, de nombreux travaux ont identifié l'évolution des grandes variables cinématiques (positions, vitesses, accélérations, angles) pour les différents segments corporels. Alexander [Alexander 83] est généralement cité pour avoir donné l'une des descriptions les plus complètes. Celle-ci a été reprise et utilisée dans de nombreux travaux aussi bien en biomécanique [Nilsson 85], en neurosciences, en robotique qu'en simulation [Boulic 90]. La figure 5.1 rappelle ce résultat pour les différents angles de flexion des membres inférieurs.

Ces travaux ont été poursuivis pour étudier l'évolution des trajectoires articulaires en fonction de la vitesse [Nilsson 85], de la pente [Lay 06], des virages [Orendurff 06] pour la marche, la course et la transition marche-course. Tous ces résultats permettent de définir des valeurs standards moyennées, obtenues sur une population type. Cependant, pour des populations extrêmes tels que les sportifs de haut niveau, les personnes âgées ou les sujets présentant une morphologie différente ou un handicap à la locomotion, il n'est pas évident de se référer à ces standards. D'autres études s'intéressent donc à identifier les différences entre les mouvements de ces sujets particuliers et ces standards.

Différentes espèces pratiquent la bipédie et une comparaison à l'homme a été proposée, entre autre, par [Alexander 04]. La littérature en biomécanique et en paléanthropologie s'accorde ainsi à dire que le mode de déplacement est naturellement choisi de manière à minimiser le coût métabolique (cela correspond à la consommation d'oxygène normalisée par la distance parcourue et la masse du sujet) [Alexander 97, Alexander 04]. D'ailleurs, si on demande à des sujets humains d'adopter une posture fléchie lors de la marche, ce coût augmente de manière significative [Carey 05]. Ceci peut être partiellement expliqué par le phénomène de transfert entre énergie cinétique et potentielle lors de la marche jambe tendue qui est naturellement observée chez l'homme [Cavagna 77, Alexander 83]. Pour des

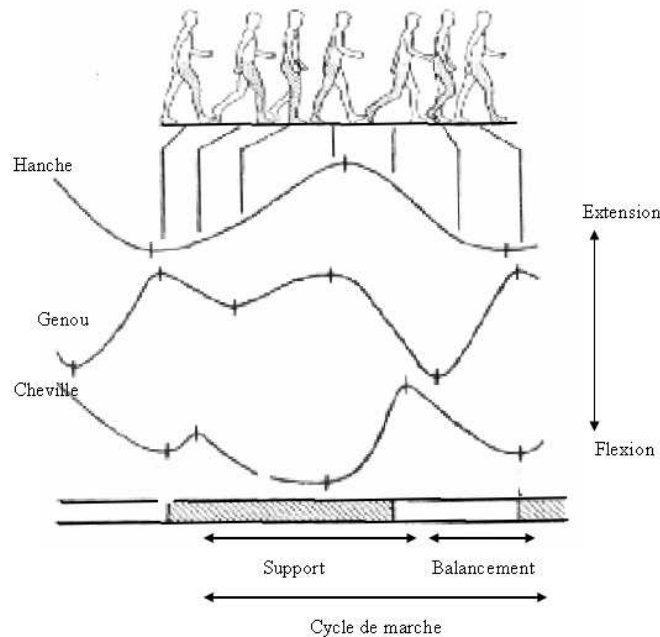


FIG. 5.1 – Cycle de locomotion pour les angles de flexion du membre inférieur inspiré des travaux de [Alexander 83].

locomotions en posture fléchie observées chez d'autres espèces, ce transfert n'existe pas car les énergies potentielles et cinétiques sont en phase [Alexander 92]. Ce transfert entre les deux énergies, en posture fléchie, serait partiellement compensé par l'énergie élastique contenue dans les structures musculaires et le transfert entre les segments [Vaughan 84]. Quelle que soit l'explication, les aspects énergétiques jouent visiblement un rôle essentiel dans le contrôle de la locomotion bipède. Toutefois, il reste difficile de relier l'énergie mécanique à l'énergie métabolique dépensée lors de l'exécution d'un mouvement.

Quelques travaux, dont ceux de Ma et Zahalak [Ma 91], ont cherché à exprimer une relation entre énergie métabolique et paramètres mécaniques exprimés sur un système poly-articulé. Cela consiste à définir expérimentalement des régressions entre les forces musculaires, les angles articulaires et le coût métabolique. Ces résultats sont applicables à des systèmes simples comme un bras évoluant en 2D [Alexander 97] mais ne semblent pas applicables à des squelettes complets en 3D. De plus, il est nécessaire de connaître les vitesses maximales de rotation de chaque segment et d'autres paramètres difficiles à retrouver pour tout type de mouvement et de sujet. L'approche la plus communément utilisée consiste à calculer le travail des forces mises en jeu en supposant qu'il est fortement lié à l'énergie métabolique dépensée par le sujet pour effectuer son mouvement [Norman 76, Winter 79, Pierrynowski 80, Williams 83, Caldwell 92]. Il existe plusieurs modes de calcul de ce travail des forces qui conduisent à des résultats différents. Nous avons travaillé sur quelques uns de ces modes de calcul afin de mieux comprendre leur influence sur la compréhension

du contrôle moteur. Ce travail est présenté dans la section 5.2.

Ainsi, même si d'autres phénomènes jouent certainement un rôle dans la genèse de la locomotion humaine (comme le contrôle des mouvements de la tête ou du regard dans des trajectoires curvilignes [Imai 01, Hicheur 05a] entre autre), les aspects énergétiques de la locomotion ont été largement étudiés. Plusieurs travaux ont d'ailleurs montré l'importance de la stabilisation de la tête pendant la locomotion [Pozzo 90]. Comme dans le reste de ce document, bien qu'un grand nombre d'aspects cognitifs jouent un rôle important dans le contrôle moteur, nous avons pour l'instant principalement travaillé sur les problèmes mécaniques. De ce point de vue, il reste donc à résoudre le problème d'évaluation de l'énergie mécanique liée au mouvement puisqu'il n'est pas possible de mesurer directement l'énergie métabolique requise lors d'une simulation numérique. Au-delà de l'aspect purement énergétique, le lien avec les paramètres cinématiques est aussi un problème clé qui permettrait de mieux comprendre, par exemple, le surcoût de la marche de sujets pathologiques pour optimiser les traitements mis en œuvre. Plus généralement, ceci permettrait de comprendre à quel point les aspects énergétiques jouent un rôle dans la production de mouvements naturels. Plusieurs auteurs ont analysé les trajectoires articulaires des membres inférieurs avec une approche multi-variables. Ainsi, ils ont constitué un repère tridimensionnel où chaque axe représente un angle d'élévation d'un segment corporel (cuisse, tibia, pied) [Bianchi 98]. Ils ont observé que la courbe obtenue s'inscrivait presque parfaitement dans un plan dont l'orientation était liée à des facteurs énergétiques. Ces résultats ont été retrouvés dans des populations handicapées [Grasso 99] ainsi que chez d'autres espèces animales [Lacquaniti 94a, Lacquaniti 94b]. Il a aussi été montré que les gestes naturels cherchaient généralement à minimiser la dérivée de l'accélération (appelée *Jerk*), ce qui entraînerait des énergies moindres [Flash 85]. Toutefois, cette théorie est encore débattue à l'heure actuelle [Hicheur 06].

Toutes ces approches se fondent principalement sur l'analyse des données expérimentales reposant sur des protocoles différents (avec ou sans tapis roulant, vitesse imposée ou non...). Pour compléter ces recherches sur la compréhension de la locomotion naturelle, il nous a semblé pertinent d'utiliser la simulation avec le principe représenté en figure 2.1. L'idée principale est de tenter de reproduire une locomotion probable à partir d'un squelette et d'hypothèses, sans se baser sur des connaissances cinématiques précises. Pour réellement s'abstraire des connaissances cinématiques connues, nous avons choisi un cadre particulier d'étude : la locomotion des hominidés fossiles. Avec nos partenaires, nous avons donc mis en place une problématique couplant des compétences en paléanthropologie, en biomécanique, en mécanique et en informatique pour répondre à ce type de question. C'est ce qui est présenté dans la section 5.3. Ainsi, suivant des hypothèses de reconstruction et de réarticulation d'un squelette fossile, nous proposons de reconstituer une marche qui minimise l'énergie requise par le système locomoteur. Appliqué à des squelettes contemporains, nous souhaitons ainsi vérifier si la minimisation d'énergie suffit à produire un mouvement comparable à des données expérimentales. Il est aussi possible de tester d'autres types d'hypothèses dans cet environnement.

Tester des hypothèses locomotrices sur des sujets fossiles avait déjà été abordé par le passé en utilisant principalement des approches comparatives [Tardieu 93, Crompton 98, Kramer 00, Nagano 05, Wang 03b]. Le principe est d'appliquer un mouvement mesuré sur une créature vivante à un spécimen de squelette fossile d'une autre espèce. Plus récem-

ment une approche appelée "robotique évolutionniste" permet de synthétiser un contrôleur sous forme d'un réseau de neurones qui est modifié afin de maximiser une fonction objectif [Sellers 05]. Le contrôleur manipule des activations musculaires qui sont appliquées à un modèle musculo-squelettique 2D. Ce dernier pose de nombreux problèmes techniques (nombre de lignes d'action, redondance importante conduisant à la restriction à la 2D, fréquence des activations et localisation du positionnement des attachements musculaires sur des espèces fossiles et, même, modernes). De plus, ce type d'approche ne permet pas de chercher une locomotion naturelle ou minimisant l'énergie. Les fonctions objectifs portent en effet plus sur la stabilité et la distance parcourue que sur des critères pouvant être liés à l'aspect naturel du mouvement.

La simulation de la locomotion bipède a été abordée par d'autres disciplines. En robotique, comme nous l'avons vu au chapitre 3, la recherche porte généralement plus sur la stabilité et la contrôlabilité que sur la production de gestes naturels. En simulation, la plupart des méthodes se fondent sur des connaissances ou sur des données expérimentales qui ne sont pas applicables pour cette problématique. Pour résoudre ce type de problème, il est nécessaire de faire le lien entre anatomie et fonction de l'articulation, ce qui n'est généralement pas le cas en simulation. Le problème appelé *motion retargetting* qui consiste à adapter un mouvement à une structure articulée se base sur des données cinématiques et géométriques alors que d'autres données anatomiques interviennent. Par exemple, modifier un mouvement humain pour tenir compte des dimensions des segments d'un chimpanzé ne suffit pas pour générer une marche crédible de singe.

Nous avons donc dû proposer une approche particulière, qui est présentée dans la section 5.3. Comme cela repose sur une minimisation d'énergie qui ne peut pas être mesurée directement par un système d'échanges gazeux, nous avons préalablement testé les différentes méthodes de calcul du travail mécanique mis en jeu. C'est ce qui est présenté dans la section 5.2.

5.2 Analyses biomécaniques

Comme nous l'avons vu, la relation entre énergie métabolique et travail mécanique n'est pas encore totalement maîtrisée. Quelle que soit la méthode, les paramètres de masse et d'inertie de chaque segment sont nécessaires et, généralement, issus de tables anthropométriques. Il a été démontré que des imprécisions sur ces valeurs avaient des conséquences importantes sur le calcul de dynamique inverse [Kwon 96, Pearsall 99, Rao 05]. Il est donc nécessaire de proposer une méthode de détermination relativement précise de ces données anthropométriques.

5.2.1 Individualisation des paramètres anthropométriques

Dans la littérature, les principales tables anthropométriques proviennent de données prélevées sur des cadavres [Dempster 55, Clauser 69, Chandler 75, Winter 90]. Cependant, les populations étudiées sont souvent âgées et n'ont vraisemblablement pas les caractéristiques anthropométriques de sujets sportifs, jeunes ou présentant des particularités (surcharge pondérale, pathologies...). Les techniques d'imagerie médicale ont permis de travailler sur des sujets vivants appartenant à des populations plus proches de celles généra-

lement étudiées (étudiants) [Zatsiorsky 90, Leva 96]. Cependant, encore une fois, ces données correspondent à des moyennes et ne sont pas individualisées en fonction des caractéristiques morphologiques des sujets. D'autres auteurs ont donc proposé de relever plusieurs mesures directes sur les sujets (périmètre du bras à différents endroits, par exemple) pour définir des modèles géométriques relativement adaptés aux segments des sujets étudiés. A partir de densités moyennes connues pour chaque segment, il est alors possible de calculer les masses et les inerties nécessaires aux différents calculs d'énergie et de dynamique inverse [Jensen 78, Yeadon 89, Wicke 03]. Cependant, le protocole (allant jusqu'à plus de 32 mesures) reste difficile à mettre en place sur de grandes populations. Il comporte aussi de nombreuses sources d'imprécision dans le relevé des informations sur le sujet.

Pour juger de cette imprécision, il suffit de comparer quelques grandeurs mécaniques (moments cinétiques, forces et même position du centre de masse) obtenues en utilisant ces méthodes et les valeurs qu'elles devraient théoriquement prendre [Kwon 96, Rao 05]. Par exemple, l'accélération du centre de masse en phase aérienne n'est plus constante et elle est différente de la gravité [Pearsall 99]. Quelques auteurs ont donc cherché à optimiser les paramètres anthropométriques des sujets afin que les grandeurs mécaniques calculées tendent vers celles attendues [Vaughan 82, Kingma 95]. Cependant ces méthodes se focalisent sur une partie du corps ou nécessitent l'utilisation de plate-formes de forces qui complexifient le protocole.

Nous avons donc proposé une méthode inspirée de ces derniers travaux mais ne nécessitant qu'un système de capture du mouvement. Pour cela, nous utilisons la relation fondamentale de la dynamique appliquée à une phase aérienne pour trouver une relation entre les paramètres anthropométriques, l'estimation du déplacement des centres articulaires et la gravité. Cette relation est exprimée comme une fonction de coût $f(\{m_i\})$ prenant une proposition de masses segmentaires m_i en entrée :

$$f(\{m_i\}) = \prod_{i=1}^n \left(\frac{1}{p(m_i) + \epsilon} \right) \times \sum_{t=1}^T \left(\ddot{G}(\{m_i\}, t) - g \right)^2 \quad (5.1)$$

où n est le nombre de segments du modèle, T est le nombre d'échantillons mesurés, $p(m_i)$ est la probabilité de la valeur prise par m_i et \ddot{G} retourne l'accélération du centre de masse à chaque instant t et pour un ensemble de masses $\{m_i\}$. $p(m_i)$ est une fonction de densité uniforme retournant 1 si la masse est comprise dans l'intervalle $[\overline{m}_i - \tau \dots \overline{m}_i + \tau]$ et 0 sinon. Dans cette équation, \overline{m}_i est une masse proposée dans une table anthropométrique de la littérature [Leva 96] et τ définit une plage de variabilité autour de \overline{m}_i .

Nous avons testé cette méthode sur une population de 10 sujets effectuant plusieurs sauts différents. Les résultats montrent que notre méthode d'optimisation des paramètres anthropométriques permet de quasiment diviser par deux l'erreur sur le calcul de l'accélération du centre de masse. Cependant, l'erreur n'est évidemment pas annulée puisqu'il reste d'autres sources d'imprécision : le système de mesure utilisé, l'estimation des centres de masse, les approximations numériques (pour le calcul des dérivées surtout) et le choix du modèle poly-articulé qui représente grossièrement le corps humain. Pour améliorer les performances de notre approche, nous avons toutefois lancé une collaboration avec A. Monin du LAAS à Toulouse, spécialiste de problèmes d'identification. Toutefois, les résultats obtenus avec notre méthode sont encourageants et permettent déjà de diminuer significativement l'imprécision liée à l'utilisation de paramètres anthropométriques inadaptés. Ce

travail a fait l'objet d'une partie de la thèse de Carole Durocher [Durocher 06a] et démontre encore une fois l'intérêt d'aborder ce type de problème de manière pluri-disciplinaire (biomécanique, informatique et identification).

5.2.2 Analyse cinématique, dynamique et énergétique de la locomotion humaine

Une fois que nous disposons des données anthropométriques et des mouvements locomoteurs d'un sujet, nous pouvons employer les différentes méthodes de la littérature pour calculer le travail mécanique requis. Nous n'avons pas voulu utiliser les méthodes directes qui nécessitent un trop grand nombre d'inconnues et pour lesquelles les valeurs des forces obtenues ne peuvent pas être validées. Nous avons donc adopté une méthode indirecte [Winter 79, Pierrynowski 80, Aleshinsky 86a, Aleshinsky 86b, Aleshinsky 86c, Aleshinsky 86d, Aleshinsky 86e, Winter 90, Willems 95].

Cette méthode repose sur le théorème de l'énergie cinétique :

$$\Delta E_c = W_{int} + W_{ext} \quad (5.2)$$

où E_c est l'énergie cinétique du système, W_{ext} est le travail des forces externes et W_{int} celui des forces internes que nous cherchons à évaluer. Dans le cas de la locomotion humaine, si on néglige les frottements de l'air, il reste deux forces externes : le poids et la force de réaction du sol. Le poids conduit à un travail W_P opposé à l'énergie potentielle E_p du système. La réaction du sol R est principalement verticale et se déplace sur une très faible distance d (dont la direction est horizontale) ce qui conduit à un travail généralement négligé.

L'énergie cinétique du système est donnée par :

$$E_C = \sum_{i=1}^n 0.5 \left(m_i \dot{x}_i^2 + I_i \dot{\theta}_i^2 \right) \quad (5.3)$$

où n est le nombre de segments considérés, m_i , I_i , x_i et θ_i sont respectivement la masse, l'inertie, la position du centre de masse et l'orientation du segment i . Il se déduit que le travail des forces internes entre deux mesures est :

$$W_{int} = \Delta \left[\sum_{i=1}^n 0.5 \left(m_i \dot{x}_i^2 + I_i \dot{\theta}_i^2 \right) \right] - mgh \quad (5.4)$$

où m est la masse du sujet, g est la gravité et h est la variation d'altitude du centre de masse entre deux instants.

Cette valeur instantanée peut être soit positive (travail efficace), soit négative (travail résistif). Il est courant d'exprimer ce travail sur un cycle de locomotion, sur une seconde ou pour une distance parcourue. Pour un mouvement parfaitement cyclique, faire la somme des valeurs calculées conduit théoriquement à une valeur nulle qui indique que le travail résistif et efficace se compensent, comme c'est toujours le cas dans un système auto-entretenu (sans perte d'énergie). [Pierrynowski 80, Winter 90] ont proposé trois méthodes différentes pour obtenir une valeur globale de travail des forces internes (ces méthodes consistent simplement à déplacer les valeurs absolues dans les équation ci-dessous) :

- sans transfert entre les différentes énergies ni entre les segments,

$$\overline{W_{int}^1} = \sum_{k=1}^m \Delta \left[\sum_{i=1}^n \left| 0.5 \left(m_i \dot{x}_i^2 + I_i \dot{\theta}_i^2 \right) \right| + |-m_i g h_i| \right] \quad (5.5)$$

- avec transfert entre les différentes énergies mais pas entre les segments,

$$\overline{W_{int}^2} = \sum_{k=1}^m \Delta \left[\sum_{i=1}^n \left| 0.5 \left(m_i \dot{x}_i^2 + I_i \dot{\theta}_i^2 \right) - m_i g h_i \right| \right] \quad (5.6)$$

- avec transfert entre les différentes énergies et entre les segments,

$$\overline{W_{int}^3} = \sum_{k=1}^m \left| \Delta \left[\sum_{i=1}^n 0.5 \left(m_i \dot{x}_i^2 + I_i \dot{\theta}_i^2 \right) - m_i g h_i \right] \right| \quad (5.7)$$

Le problème consiste à choisir le mode de calcul qui reflète au mieux le coût métabolique du sujet à la marche. Il semble que $\overline{W_{int}^3}$ qui implique des transferts d'énergie entre et à l'intérieur des segments soit le mieux corrélé avec le coût métabolique [Burdett 83, Winter 90, Minetti 94, Unnithan 99]. Cependant, avec ce mode de calcul, une personne tenant une masse à bout de bras, sans bouger, produit un travail nul alors qu'on peut mesurer un coût métabolique supérieur à celui qu'il a en position de repos. Pendant la marche, on peut donc raisonnablement penser que cette méthode apporte aussi une certaine imprécision. L'idéal est, évidemment, de disposer d'information sur les forces mises en jeu par chaque muscle et d'utiliser des équations de régression conduisant au coût métabolique correspondant [Ma 91]. Cependant, il y a un trop grand nombre de variables difficiles à quantifier individuellement pour chaque sujet. De plus, la méthode paraît difficile à généraliser au corps entier, en 3D. Nous avons donc choisi d'utiliser $\overline{W_{int}^3}$ malgré les remarques ci-dessus, ne disposant pas, à notre connaissance de meilleur prédicteur du coût métabolique dans notre cas de figure.

$\overline{W_{int}^3}$ offre l'avantage de prendre en compte les échanges d'énergie entre et à l'intérieur des segments, ce qui semble être un phénomène particulièrement important pendant la locomotion. En effet, plusieurs recherches ont montré [Sakurai 85, Novacheck 98] que les énergies cinétiques et potentielles étaient en opposition de phase pendant la marche favorisant ainsi un transfert entre ces deux énergies et démontrant un fonctionnement mécanique proche de celui d'un pendule inversé. A l'inverse, pendant la course, ces énergies sont en phase et l'énergie élastique des muscles permet de compenser partiellement ce manque de transfert.

On peut donc s'interroger sur les raisons qui pourraient expliquer ce changement de stratégie entre la marche et la course et l'examen du travail des forces internes calculé avec la méthode $\overline{W_{int}^3}$ devrait pouvoir nous apporter des éléments de réponse. En effet, les données de la littérature s'accordent à dire que ce phénomène est très lié à des aspects énergétiques : le travail des forces [Minetti 94] et l'énergie métabolique [Margaria 63] diminuent lors de la transition. Ceci signifie que les courbes d'énergie (métabolique ou mécanique) pour la marche et pour la course se croisent en un point qu'on appelle vitesse théorique de transition. Cependant, d'autres auteurs [Hreljac 93] ont montré que lorsqu'on impose cette

vitesse théorique à des sujets, ils choisissent de courir. De plus, les vitesses théoriques obtenues avec les énergies métaboliques et mécaniques sont différentes. Ceci laisse supposer qu'il y a d'autres paramètres qui rentrent en ligne de compte.

Nous avons cherché à analyser plus finement ce phénomène. On espère ainsi mieux cerner les variables mathématiques nécessaires pour choisir une stratégie locomotrice plutôt qu'une autre. Si on peut expérimentalement trouver une variable qui caractérise ce changement de stratégie, on devrait pouvoir l'utiliser pour chercher une locomotion probable à un squelette bipède donné.

Nous avons demandé à 5 sujets entraînés en endurance, 5 entraînés en sprint et 5 sédentaires de marcher et de courir à des vitesses augmentant par pas de 1 km.h^{-1} . Nous avons mesuré les paramètres cinématiques qui permettent de calculer \overline{W}_{int}^3 ainsi que la consommation d'oxygène qui nous permet d'évaluer le coût métabolique. En traçant, pour chaque type d'énergie, l'évolution de sa valeur aux différentes vitesses, on obtient bien un point de croisement à des vitesses différentes, comme le montre la figure 5.2 pour un groupe de sujets.

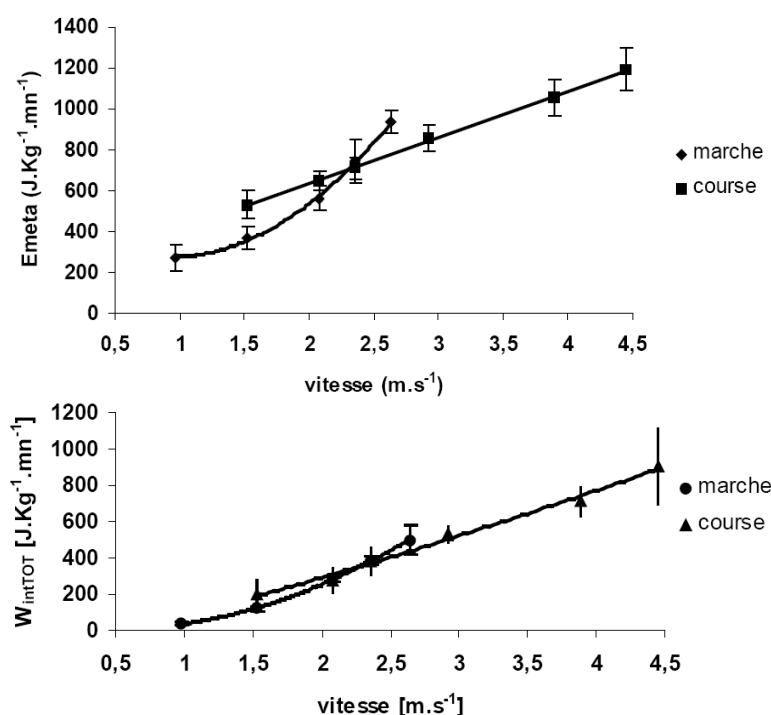


FIG. 5.2 – Croisement des courbes d'énergie métabolique et de travail des forces internes pour différentes allures de marche et de course.

Statistiquement, nous avons pu montrer [Beaupied 03] trois relations différentes entre ces points de croisement en fonction du type d'entraînement des sujets :

- la vitesse théorique obtenue à partir du coût métabolique est inférieure à celle calcu-

- liée avec le travail mécanique pour les sujets non-entraînés,
- la vitesse théorique obtenue à partir du coût métabolique est supérieure à celle calculée avec le travail mécanique pour les sujets entraînés en sprint,
- et elles sont proches pour les sujets entraînés en endurance.

Ceci montre tout d’abord que les deux types d’énergie ne véhiculent pas tout à fait les mêmes phénomènes et que le travail des forces internes \overline{W}_{int}^3 n’est pas réellement un reflet exact du coût métabolique. On peut ensuite proposer deux explications à ces différences. La première est que cette stratégie locomotrice ne s’explique peut-être pas que par des notions énergétiques. Cela implique aussi certainement des paramètres tels que la valeur maximale des longueurs des foulées, l’adaptation métabolique de la consommation d’énergie en fonction de l’entraînement ou la sous-évaluation des énergies métaboliques pour les sujets non-entraînés qui sortiraient plus vite que les autres du mode purement aérobie à haute vitesse. La deuxième explication concerne le mode de calcul qui ne retranscrit peut-être pas la restitution mécanique exacte des énergies métaboliques mises en jeu pour effectuer le mouvement.

De cette étude, on retient donc la difficulté de définir un calcul du travail mécanique qui soit en lien avec le coût métabolique mis en jeu lors du mouvement. Mis à part le fait de calculer les forces issues de chaque muscle, on est donc contraint, malgré ces limitations, à utiliser le calcul \overline{W}_{int}^3 qui semble parfois en adéquation avec les phénomènes étudiés. Il faut cependant être conscient qu’une partie des phénomènes semble échapper à ce calcul. Nous proposons maintenant un ensemble d’approches permettant de tester l’influence des différentes connaissances disponibles en biomécanique (dont les problèmes énergétiques évoqués dans cette section) sur la simulation d’une marche bipède.

5.3 Simulation de la locomotion bipède

Dans les sections précédentes, nous avons montré qu’il existait un grand nombre d’hypothèses sur la forme des trajectoires qui ne peuvent à priori pas être utilisables pour proposer une locomotion pour tout type de créature bipède. Pour la locomotion humaine, nous avons expérimenté plusieurs types de modèles descriptifs permettant de générer différentes formes de marche et de course (données anthropométriques et terrains différents). Ces modèles ont été validés sur plusieurs populations de sportifs et de sujets sédentaires. Ils démontrent l’invariance des formes des trajectoires, quel que soit le type de population et montrent aussi comment ces formes sont adaptées en fonction des conditions. Ce résultat est suffisamment abouti pour donner lieu à un transfert technologique vers l’industrie du multimédia (projets PRIAMM HVTR, RIAM AVA MOTION, RIAM SEMOCAP) en utilisant *MKM* présenté dans le chapitre 3.

Cependant, ces approches ne permettent pas d’expliquer les fondements de la locomotion humaine mais cherchent uniquement à reproduire des trajectoires réalistes pour animer des personnages synthétiques. L’objectif du travail présenté dans cette section est d’aller plus loin dans la compréhension des mécanismes fondamentaux de la locomotion humaine en :

- travaillant à partir d’un minimum de données (données ostéologiques¹ et empreintes

¹Donnée ostéologique : prélevée directement sur l’os.

sur le sol) afin de tester des hypothèses allant bien au-delà de la simple description des cycles de locomotion,

- analysant comment les modèles s’adaptent à des conditions extrêmes comme des performances de haut niveau ou un handicap (hémiplégie entre autre),

Cet axe est très important dans le groupe biomécanique et fédère non seulement les compétences de ses membres mais répond aussi aux demandes d’autres disciplines scientifiques : robotique (collaboration avec le LAAS CNRS de Toulouse), simulation, anthropologie et médecine.

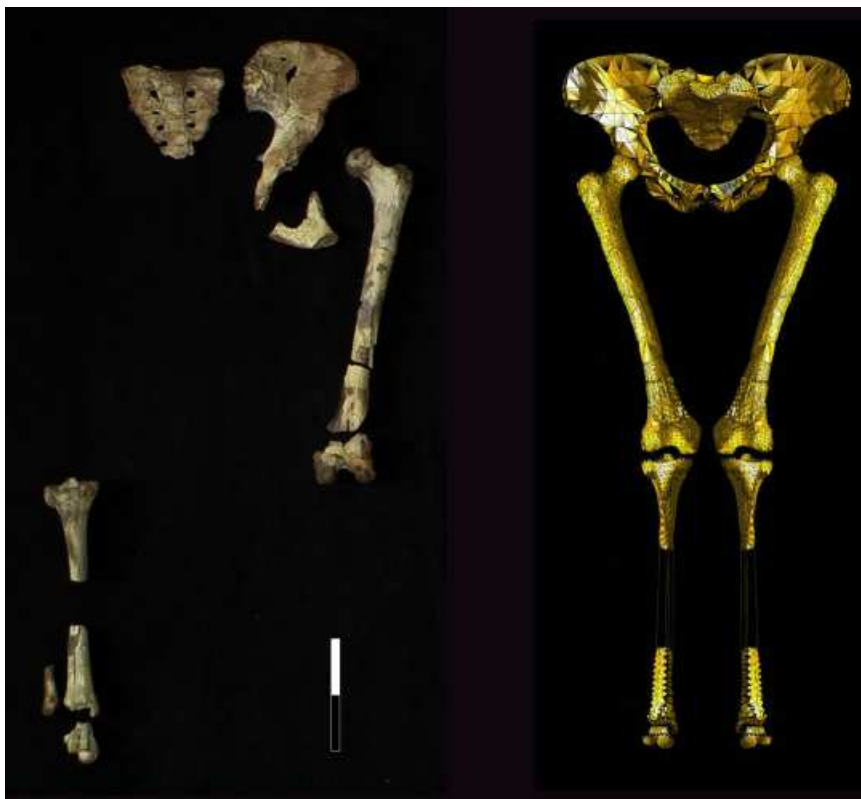


FIG. 5.3 – données ostéologiques (à gauche) et hypothèse de reconstruction (à droite) fournies par l’UPR 2147 CNRS en entrée du module de simulation de la marche. Photo G. Berillon, avec l’autorisation du Museum National d’Ethiopie.

Pour répondre à un tel problème, une première idée serait d’appliquer des méthodes d’optimisation telles que celles proposées en animation [Witkin 88, Cohen 92, Liu 94]. Le but serait de faire varier la totalité des trajectoires articulaires jusqu’à obtenir un minimum de travail mécanique. Cependant, lancer une procédure d’optimisation directement sur la totalité des degrés de liberté pour un cycle complet de marche conduirait à explorer un espace de recherche immense qui entraînerait inévitablement des problèmes de convergence. Pour simplifier le problème, nous nous sommes inspirés des travaux menés au

LAAS [Esteves 06] sur la planification de trajectoires locomotrices pour des mannequins virtuels. Le principe est d'effectuer une recherche dans l'espace des configurations d'un robot. Cet espace est limité à ses degrés de liberté globaux : position et orientation. Les autres degrés de liberté sont retrouvés par d'autres méthodes, comme le mélange de mouvements et la cinématique inverse. Bien que notre problème soit différent, décomposer les degrés de liberté en deux parties pour simplifier le problème est une approche intéressante.

Nous avons donc choisi de traiter le mouvement des pieds séparément du reste du corps. Ainsi, nous employons une première méthode pour proposer des trajectoires cartésiennes de pieds, exprimées dans le repère du bassin. Cette trajectoire doit passer par les empreintes que nous souhaitons imposer. Des empreintes associées à la même espèce que Lucy ont d'ailleurs été trouvées en Tanzanie [Leakey 87] et fournissent donc des informations pertinentes sur les espaces entre les pieds et leur orientation. Même si ces empreintes ne peuvent évidemment pas être attribuées à Lucy, elles permettent d'apporter quelques hypothèses supplémentaires pour mieux retrouver la locomotion probable de cette espèce.

Ensuite, nous calculons par cinématique inverse le reste des degrés de liberté qui permettent de suivre cette trajectoire et évaluons le résultat en terme de dépense énergétique (inclus dans une fonction de coût). Nous faisons alors varier les paramètres ayant permis de calculer une trajectoire de pied et répétons le processus jusqu'à trouver un mouvement global qui minimise la fonction de coût. En sortie, nous disposons donc d'une locomotion qui passe par les empreintes imposées et qui minimise le critère modélisé par la fonction de coût. Le travail est donc organisé comme le montre la figure 5.4. Il fait l'objet d'une thèse co-encadrée avec G. Berillon, de l'UPR 2147 CNRS. La thèse de G. Nicolas doit d'ailleurs être soutenue prochainement avec un jury pluridisciplinaire incluant des personnalités de la biomécanique, de la paléanthropologie et de l'animation.

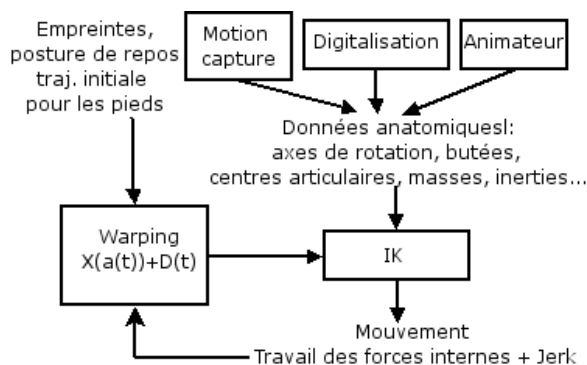


FIG. 5.4 – Organisation globale des travaux menés sur la simulation de locomotions probables pour différents bipèdes principalement partir de données ostéologiques.

Dans la suite du document, nous appelons "poulaine" la trajectoire du pied exprimée dans le repère du bassin. Le squelette sur lequel nous travaillons doit pouvoir être suffisamment général pour s'adapter aux différents hominidés et primates. En collaboration avec l'UPR2147 CNRS, nous avons proposé la structure représentée en figure 5.9 qui se limite à la ceinture pelvienne (bassin et membres inférieurs) et qui comporte 11 degrés de libertés :

3 rotations au bassin, 3 à chaque hanche et un à chaque genou. Une procédure de réarticulation des os séparés a été proposée par l'UPR2147 [Berillon 05]. Le nombre de degrés de liberté est volontairement limité afin de tester notre approche et en raison du faible nombre de données osseuses disponibles pour les fossiles. Il pourra être étendu ultérieurement pour gérer, par exemple, les pieds et le haut du corps.

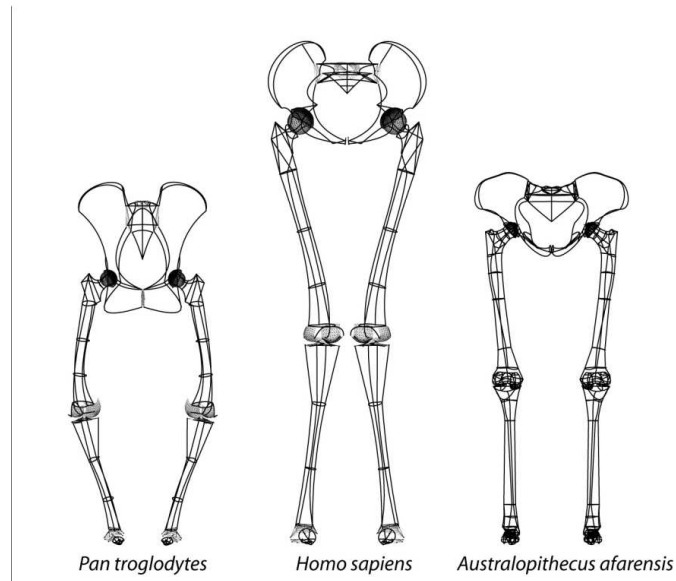


FIG. 5.5 – Représentations numériques de chaînes pelviennes d'un chimpanzé, d'un homme moderne, et de Lucy (A.L. 288-1).

Dans la section 5.3.1 nous présentons l'algorithme de cinématique inverse proposé pour calculer les trajectoires articulaires des 11 degrés de liberté en supposant que l'on dispose de la position des pieds à chaque instant. L'objectif est de proposer une méthode capable de prédire des trajectoires articulaires plausibles si on fournit une poulaine réelle ou réaliste. Ensuite, la section 5.3.2 présente l'algorithme de calcul des poulaines et la boucle d'optimisation qui permet de proposer une locomotion répondant aux critères que nous avons choisis. Ces critères sont présentés dans cette même section.

5.3.1 Cinématique inverse à partir d'une poulaine à tester

Comme nous venons de le voir, nous décrivons le squelette d'un bipède grâce à 5 corps rigides reliés entre eux par des articulations parfaites conduisant à 11 degrés de liberté en rotation. Si on considère le milieu des épines Illiac comme l'origine de la chaîne cinématique, on obtient une fonction de cinématique directe liant la position des deux malléoles externes en fonction de la position du bassin et de l'état de ces 11 degrés de liberté : $X = f(\theta)$.

Dans cette partie, on considère disposer d'une trajectoire de cheville dans le repère

du bassin (soit en provenance de capture de mouvements, soit calculée à partir du module de déformation de poulaine évoqué précédemment). Disposant ainsi des $X(t), \forall t$, le problème revient donc maintenant à trouver les $\theta(t)$ correspondant en inversant $f : \theta(t) = f^{-1}(X(t))$. $X(t)$ est de dimension 6 (trois coordonnées cartésiennes par côté) et conduit donc à un espace de solutions de dimension $11-6=5$, ce qui ne permet pas une inversion directe de f . De même, les méthodes évoquées au chapitre 3, ne peuvent pas être utilisées puisqu'elles font l'hypothèse que l'on connaisse un mouvement de référence, ce qui n'est pas le cas ici. La méthode qui semble la plus adaptée consiste donc à linéariser localement f avec la méthode fondée sur un développement de Taylor à l'ordre 1 (utilisant le jacobien J de f) :

$$\Delta X = J(\theta)\Delta\theta \implies \Delta\theta = J^+ \Delta X + P_N(J)\delta \quad (5.8)$$

où $P_N(J) = I - J^+J$ est l'opérateur de projection sur le noyau de la fonction et δ est un vecteur utilisé pour modéliser le déplacement à appliquer pour tenir compte de tâches secondaires à minimiser. δ est projeté dans le noyau pour assurer qu'il ne remette pas en cause la contrainte principale de passage des chevilles par la poulaine imposée.

La prise en compte de priorités [Baerlocher 04] entre les deux contraintes aux chevilles n'a pas d'intérêt ici puisqu'on cherche à suivre exactement les deux poulaines. Les contraintes à chaque pied ont donc le même poids et doivent être résolues ensembles. Il reste ensuite à définir les lois et le mode de calcul de δ . Dans la littérature, en sciences du mouvement, le mouvement naturel a été expliqué grâce à plusieurs hypothèses. Les plus répandues sont la minimisation de l'énergie et du Jerk [Flash 85]. D'autres lois existent mais elles s'appliquent à des gestes particuliers comme l'écriture [Viviani 82] ou les trajectoires locomotrices [Hicheur 05b]. D'autres lois paraissent trop contraignantes dans le cadre de notre application, comme la loi de covariance planaire [Bianchi 98] qui n'est évidemment pas démontrée pour des espèces fossiles.

Dans notre approche, ce serait une erreur de prendre en compte un grand nombre de lois car cela conduirait à proposer une somme pondérée de vecteurs δ qui n'aurait peut-être plus de sens. De plus, il faut aussi tenir compte des butées articulaires qui interviennent au même niveau, dans la détermination de δ . Pour chaque créature bipède étudiée, il faut aussi prendre en compte une posture de repos qui provient soit de mesures soit d'hypothèses provenant de reconstructions des paléoanthropologues [Berillon 05], ce qui complique encore la détermination de δ . Au final, nous avons proposé d'utiliser uniquement le principe de minimisation d'énergie qui semble être une caractéristique commune à un grand nombre d'espèces animales pour le cas particulier de la locomotion. On obtient donc une somme pondérée de trois contraintes :

$$\begin{aligned} \text{cout}(\theta_P) = & \beta_1 \left[\sum_{i=1}^{11} \left(e^{\varsigma(\theta_i - \text{bsup}_i)} \right) + \left(e^{\varsigma(\text{binf}_i - \theta_i)} \right) \right] \\ & + \beta_2 \left[\sum_{i=1}^5 \frac{1}{2} R_i I_i R_i^T (\omega(\Delta\theta))^2 \right] \\ & + \beta_3 [\text{dist}(\theta, \theta_{ref})] \end{aligned} \quad (5.9)$$

où les β représentent les poids associés à chaque contrainte. Dans cette équation ς représente une constante qui permet d'influencer la pente de la courbe exponentielle utilisée pour modéliser les butées. Ces poids ont été choisis pour assurer que toutes les contraintes

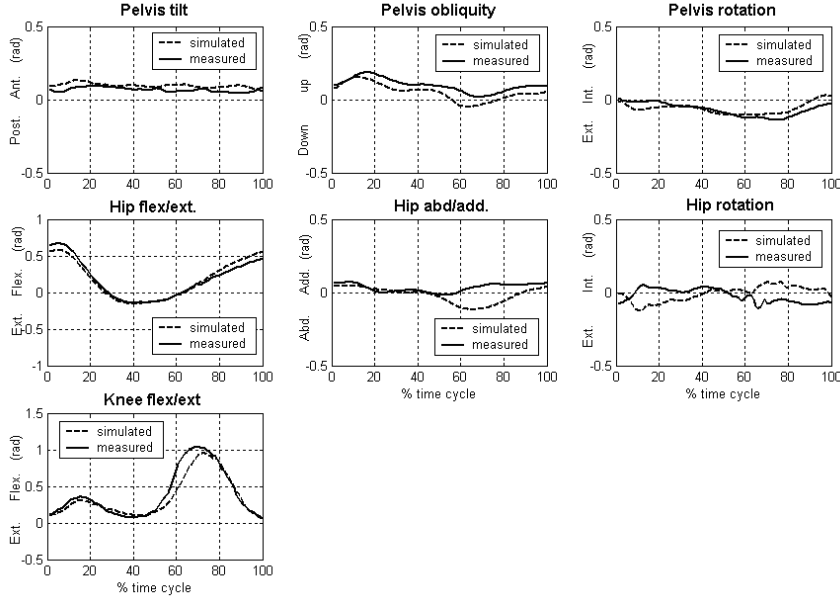


FIG. 5.6 – Comparaison de trajectoires angulaires simulées et mesurées sur un sujet humain pour le pelvis, la hanche et le genou.

retournent des valeurs évoluant dans le même ordre de grandeur. $\theta_P = \theta + \Delta\theta + P_N(J)\delta$ pour une valeur de δ donnée. Cette fonction est la somme de trois sous-fonctions :

- le respect des butées articulaires $binf_i$ et $bsup_i$ pour chaque degré de liberté i . C'est une fonction qui croît rapidement en dehors de butées et qui reste proche de zéro sinon.
- la minimisation d'énergie cinétique de rotation qui contribue largement à l'énergie dépensée lors de gesticulations. Dans cette formule, R_i est la matrice de passage du repère global au repère local à l'articulation et ω est la fonction qui retourne le vecteur vitesse de rotation pour chaque segment.
- le respect d'une posture de référence θ_{ref} fournie en entrée comme hypothèse de reconstruction du squelette en position de repos. $dist$ est une fonction qui retourne la distance entre deux postures.

Nous utilisons une approche de type *MultiDirectional Search* [Torczon 89] pour chercher le δ qui minimise la fonction de coût.

Nous avons expérimenté notre approche sur un grand nombre de sujets humains et comparé les résultats à des données expérimentales capturées sur les mêmes sujets. Le détail de ces résultats est présenté dans l'article [Nicolas 06]. Nous donnons tout de même quelques résultats dans la figure 5.6 et dans le tableau 5.1. Ces résultats montrent que l'on reproduit plutôt bien un mouvement naturel malgré l'espace important (dimension 5) de solutions possibles. Toutefois, on peut constater dans le mouvement généré une discontinuité dans le mouvement de bassin. Ceci provient de la minimisation locale de la fonction de coût qui ne

permet pas d'anticiper la rotation de bassin nécessaire pour atteindre les positions extrêmes de chevilles imposées par la poulaine. Pour pallier cet inconvénient, il faudrait mettre en œuvre une méthode de minimisation globale. Toutefois, les résultats obtenus avec cette méthode semblent suffisants pour pouvoir être utilisés dans l'approche globale de simulation de locomotion à partir de données ostéologiques.

		Pelvis			Hanche gauche	
Angles (rad)	tilt	obliquité	rot. int/ext	tilt	obliquité	rot. int/ext
Amplitude moyenne (rad)	0.42/0.05	0.16/-0.14	0.18/-0.16	0.74/-0.44	0.23/-0.11	0.19/-0.18
Erreur (rad +/-std)	0.03(0.01)	0.02(0.01)	0.02(0.01)	0.05(0.02)	0.03(0.01)	0.03(0.01)
% erreur	7.8	6.7	6.8	4.1	9.7	8.1

		Hanche droite		Genou gauche	Genou droit
Angles (rad)	tilt	obliquité	rot. int/ext	flex/ext	flex/ext
Amplitude moyenne (rad)	0.77/-0.43	0.2/-0.13	0.2/-0.19	1.3/-0.02	1.27/-0.04
Erreur (rad +/-std)	0.04(0.01)	0.03(0.01)	0.03(0.01)	0.02(0.01)	0.02(0.01)
% erreur	3.7	9.7	7.4	1.8	1.7

TAB. 5.1 – Erreur moyenne (+écart type) entre trajectoires angulaires mesurées et simulées avec notre approche pour tous les sujets humains.

Ces travaux ont été publiés en animation [Nicolas 04] pour la méthode de calcul et en biomécanique [Nicolas 06] pour la validation sur un grand nombre de sujets humains.

5.3.2 Déformation et évaluation de poulaines

Cette section décrit la méthode utilisée pour proposer des poulaines à tester au module de cinématique inverse décrit précédemment, comme l'indique la figure 5.4. Ainsi, on suppose disposer des informations suivantes : une description complète du squelette avec position des centres articulaires, définition des axes de rotation principaux, des limites angulaires, des empreintes successives à suivre sur le sol, d'une posture de repos du personnage, des masses et des inerties de chaque segment. On suppose aussi que l'utilisateur fournit la durée d'un cycle de marche (compris entre les instants t_0 et t_f).

Pour chercher la poulaine qui entraîne la plus faible consommation d'énergie pour la créature étudiée, nous avons mis en œuvre une méthode d'optimisation. La fonction de coût à minimiser comprend le calcul du travail des forces internes \bar{W}_{int}^3 présenté en section 5.2.2. Toutefois, minimiser uniquement l'énergie pour effectuer un mouvement peut conduire mathématiquement à des solutions aberrantes. En effet, supposons que l'on souhaite lever le bras en une seconde tout en minimisant cette fonction de coût uniquement. Une solution acceptable du point de vue mathématique est de ne pas bouger jusqu'au dernier pas de temps puis de lever le bras dans le court instant qui reste. Le travail mécanique est nul pendant toute la phase immobile. Même si cela entraîne de fortes accélérations sur un pas de temps, la moyenne sur la durée du geste peut donc être très basse.

C'est pourquoi nous avons ajouté la minimisation du Jerk [Flash 85] qui assure que les accélérations et leurs variations ne prennent pas des valeurs trop importantes. La fonction de coût devient donc :

$$\min_{\theta} \frac{1}{t_f - t_0} \sum_{t=t_0}^{t_f} |W_{int}(\theta, t)| + \left(\frac{d^3\theta(t)}{dt^3} \right)^2 \quad (5.10)$$

où $\frac{1}{t_f - t_0} \sum_{t=t_0}^{t_f} |W_{int}(\theta, t)|$ représente le travail mécanique moyen calculé avec le transfert d'énergie entre et à l'intérieur des segments (noté $\overline{W_{int}^3}$).

A partir des données ostéologiques, on dispose de la fonction cinématique $X(\theta)$ qui retourne la position de la cheville dans le repère du bassin en fonction des angles à chaque articulation. Cette fonction est la même que celle utilisée par le module de cinématique inverse. $X(\theta)$ permet aussi de calculer la position des pieds aux instants de contact au sol, à gauche $X(\theta(t_{lFS}))$ et à droite $X(\theta(t_{rFS}))$. Pour le contact au sol à gauche, on peut ainsi obtenir la position relative du pied droit par rapport au pied gauche. Afin de respecter les empreintes imposées, l'équation suivante doit être respectée :

$$-X_l(\theta(t_{rFS})) + X_r(\theta(t_{rFS})) = F_r - F_l \quad (5.11)$$

où F_r et F_l sont respectivement la position de l'empreinte à droite et à gauche. Ainsi la solution au problème d'optimisation doit vérifier cette contrainte. Au final, on doit donc effectuer une optimisation de la fonction 5.10 sous contrainte 5.11.

Résoudre ce problème en faisant varier directement la position des pieds conduirait à un espace de recherche immense. Pour simplifier le problème, il est nécessaire de diminuer l'espace de recherche en proposant une représentation paramétrique de la trajectoire des pieds, comme l'avait proposé Cohen [Cohen 92]. De même, dans ce problème d'optimisation, il est nécessaire de proposer une valeur de départ pour les paramètres à optimiser. Plutôt que de fournir des valeurs aléatoires comme point de départ à l'optimisation, nous avons choisi de partir d'une poulaine moyenne d'homme moderne obtenue expérimentalement. Cette poulaine dite de référence est représentée par une spline hiérarchique, comme le suggère Cohen. La spline hiérarchique revient à représenter grossièrement une courbe par un polynôme de degré quelconque (nous avons choisi un degré égal à 3) défini par morceaux sur la durée du mouvement. Les détails qui échappent à cette représentation grossière sont eux-aussi modélisés par le même type de polynôme et ainsi de suite. Le gros avantage de cette représentation est qu'on peut modifier l'aspect global de la courbe en jouant sur le polynôme le plus grossier, sans se soucier des détails. Ainsi, dans notre processus d'optimisation, nous ne faisons varier que les paramètres, appelés points de contrôle CP , du polynôme le plus grossier. CP représente les points par lesquels le polynôme doit passer au lieu de mémoriser ses coefficients. Les valeurs contenues dans CP ont directement un sens dans l'espace 3D dans lequel évolue le pied. Lorsqu'on veut changer la courbe pour faire passer le pied à une position donnée dans l'espace, il suffit alors de placer le point de contrôle correspondant directement à cette position.

CP est initialement choisi dans la poulaine moyenne de départ pour contenir tous les points de dérivée nulle, comme l'indique la figure 5.7. Le problème peut donc se récrire en fonction de CP au lieu de θ dans les équations 5.10 et 5.11. On se retrouve donc avec

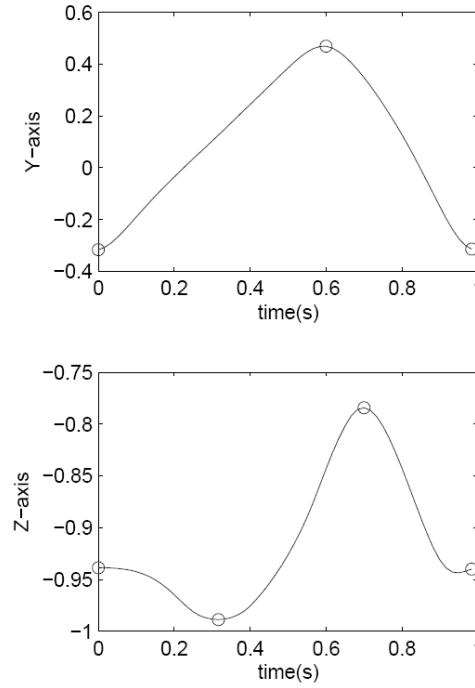


FIG. 5.7 – Points de contrôle initialement choisis sur la poulaine moyenne (axe longitudinal en Y, axe vertical en Z).

un total de 7 points de contrôle (2 pour X, 2 pour Y et trois pour Z) pour représenter les trajectoires de pieds suivant les trois axes pour un cycle complet. Bien que le problème soit réduit à un espace plus petit, la fonction reste non-linéaire et, donc, impossible à optimiser par une simple inversion analytique.

Pour résoudre ce problème, nous avons choisi de linéariser localement la fonction en effectuant un développement de Taylor à l'ordre 1. Posons $\Delta F = (F_r - F_l)_{new} - (F_r - F_l)_{old}$, la différence entre les empreintes imposées et celles naturellement liées à la poulaine de référence. En inversant la linéarisation locale de l'équation 5.11, on obtient :

$$\Delta(CP, t_{rFS}) = J(CP, t_{rFS})^+ ((F_r - F_l)_{new} - (F_r - F_l)_{old}) \quad (5.12)$$

où J est le Jacobien de l'équation 5.11 dans laquelle $X_l(\theta(t_{lFS}))$ est remplacé par $X_l(CP, t_{lFS})$ pour tenir compte de la représentation paramétrique de la poulaine. $\Delta(CP, t_{rFS})$ représente la modification à apporter au vecteur CP et à l'instant de contact au sol t_{rFS} pour vérifier la contrainte. Comme plusieurs valeurs de $\Delta(CP, t_{rFS})$ vérifient l'équation 5.12, l'inversion retourne une solution de norme minimale qui ne garantit pas de minimiser le travail des forces internes. On peut alors ajouter un vecteur déplacement δ_{CP} à cette solution de norme minimale afin de trouver la solution qui minimise ce travail. δ_{CP} doit cependant être projeté dans l'espace des solutions de l'équation 5.12 grâce à l'opérateur de projection

$$P_F(J) = (I_J(CP, t_{rFS})^+ J(CP, t_{rFS}) :$$

$$\Delta(CP, t_{rFS}) = J(CP, t_{rFS})^+ ((F_r - F_l)_{new} - (F_r - F_l)_{old}) + P_F(J)\delta_{CP} \quad (5.13)$$

Tout le problème consiste donc maintenant à proposer des valeurs de δ_{CP} qui assurent que le résultat minimise le travail des forces internes. Pour y parvenir, nous effectuons la boucle suivante :

```

fini = faux
 $X_a = X_{reference}$ 
Tant que pas fini
    sélectionner  $\delta_{CP}$ 
     $X_l = X_a + \Delta(CP, t_{rFS})$ 
     $X_r = \text{symétriser}(X_l)$ 
     $E_r = IK(X_l, X_r)$ 
    fini = ( $\Delta Err < \epsilon$ )
     $X_a = X_l$ 
Fin Tant que

```

$IK(X_l, X_r)$ est le module de cinématique inverse présenté dans la section 5.3.1 qui retourne les trajectoires angulaires et la valeur à minimiser dans l'équation 5.10 (incluant minimisations d'énergie et du Jerk). $\text{symétriser}(X_l)$ est une fonction qui calcule une poulaine symétrique à celle calculée pour le côté gauche, ce qui évite d'avoir des trajectoires différentes pour les deux côtés. $\text{sélectionner } \delta_{CP}$ est une fonction qui fournit différentes valeurs de δ_{CP} à tester dans l'équation 5.13. Nous avons choisi la méthode de sélection de l'algorithme *Multidirectional Search* MDS introduit par Torczon [Torczon 89].

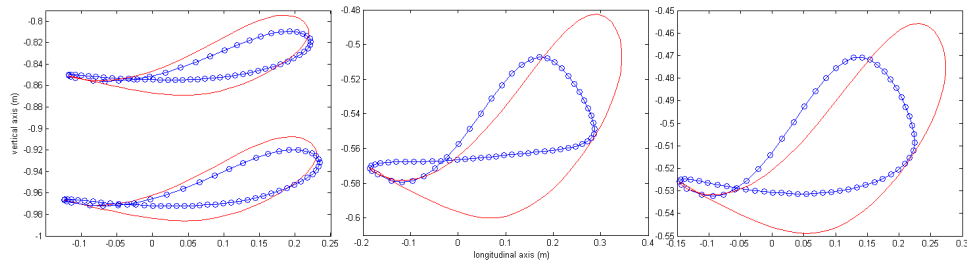


FIG. 5.8 – Poulaines obtenues après optimisation pour deux humains (à gauche), un chimpanzé (au milieu) et Lucy (à droite) et comparaison à la poulaine de référence.

Cependant, il est nécessaire d'ajouter une contrainte sur la longueur des pas afin d'éviter d'aboutir à la conclusion évidente que minimiser l'énergie revient à faire tendre la longueur des pas vers zéro. Le système minimise donc l'énergie et le Jerk en préservant une longueur imposée des pas. La figure 5.8 montre les résultats obtenus pour deux humains de tailles différentes. On constate que les poulaines optimisées ressemblent à celle de référence mais qu'elles sont légèrement écrasées verticalement, diminuant ainsi les oscillations verticales du centre de masse et la remontée du pied pendant la phase de balancement.

Nous avons expérimenté notre approche sur deux humains très différents (homme grand et femme petite) pour lesquels nous disposions des trajectoires articulaires de marche. Le résultat nous a montré qu'après optimisation, la forme caractéristique des poulaines humaines est conservée. De plus, le travail des forces internes calculé avec le mouvement optimisé est très proche de celui obtenu directement avec la poulaine de référence. Nous avons ensuite expérimenté notre approche sur un chimpanzé ce qui nous a donné des résultats relativement différents. La figure 5.8 montre les poulaines obtenues après optimisation en comparaison de celle de référence (la même que celle utilisée pour les humains). On peut constater que la forme a changé. De plus, on obtient une forte diminution du travail des forces internes après optimisation (passage de $50 J.Kg^{-1}.min^{-1}$ à $30 J.Kg^{-1}.min^{-1}$). L'expérimentation sur une reconstruction de Lucy (A.L. 288-1, *Australopithecus afarensis*) [Berillon 05] nous a aussi conduit à une forme différente de poulaine et à une diminution du travail des forces internes de $51 J.Kg^{-1}.min^{-1}$ à $19 J.Kg^{-1}.min^{-1}$. La figure 5.9 montre quelques copies d'écran du mouvement généré après optimisation dans le plan sagittal et dans le plan frontal.

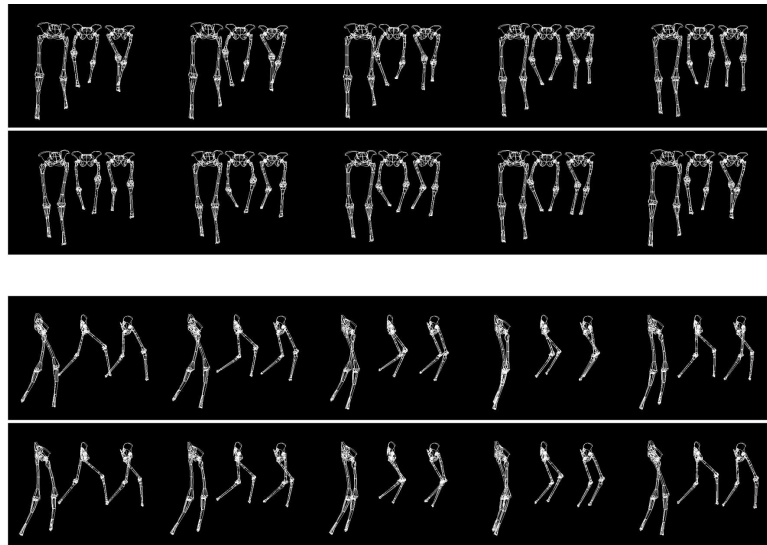


FIG. 5.9 – Copies d'écran de la marche obtenue après optimisation sur les données ostéologiques d'un humain (à gauche), d'un chimpanzé (au milieu) et de Lucy (à droite).

Ces résultats sont préliminaires et une campagne de validation doit être menée afin de comparer les simulations obtenues à des données expérimentales. Sur l'humain, cela peut être mené à partir des données expérimentales dont nous disposons déjà. Dans le cadre de la collaboration avec G. Berillon, des contacts sont engagés avec K. D'Août du Laboratoire de Morphologie fonctionnelle, en Belgique, afin de proposer des protocoles expérimentaux sur différentes espèces de singes. De même, nous faisons partie du GDR CNRS HOMA-DAPT piloté par L. Rosetta de l'UPR 2147 CNRS "Dynamique de l'Evolution Humaine" afin de disposer d'autres informations sur la locomotion de singes *Papio*. Ces données

nous permettront de valider ou d'adapter notre méthode de simulation si les résultats sont éloignés des mesures. Pour Lucy, évidemment, nous ne pouvons pas disposer de données expérimentales. On suppose alors que si l'approche prédit relativement bien la locomotion de divers bipèdes vivants, elle devrait raisonnablement s'appliquer à des espèces éteintes.

En plus de ces validations, nous souhaitons étendre notre approche. Il nous semble, en effet, important de modéliser finement les pieds qui jouent un rôle prédominant dans la locomotion, ainsi que le haut du corps qui peut avoir une influence importante sur l'équilibre de la créature. Cette première étape a permis de démontrer la faisabilité de l'approche et ouvre donc un grand nombre de perspectives.

5.4 Conclusion et perspectives

Les travaux présentés dans ce document ont eu plusieurs répercussions théoriques et pratiques. Les aspects fondamentaux évoqués tout au long de ce chapitre ont donné lieu à des valorisations dans le domaine industriel. Nous rappelons maintenant les différents modèles de locomotion que nous avons proposés en montrant qu'ils ont tous été conçus pour répondre à la fois à des considérations théoriques et de transfert industriel :

- un modèle procédural qui avait été initié lors de ma thèse [Multon 98] et qui avait été enrichi dans le cadre du projet PRIAMM "Humain Virtuel Temps Réel" (financé par le Centre National de Cinématographie et le Ministère des Finances). Ce modèle avait été obtenu en prélevant des postures clés sur des mouvements de marche dans diverses situations (lignes droites, courbes, montées/descentes et sauts). Une méthode d'interpolation polynomiale ainsi qu'une correction tenant des postures clés à partir de la configuration du sol avait permis à notre partenaire industriel (du domaine du jeu vidéo) CRYO de disposer d'un module temps réel de locomotion. Cependant, comme nous l'avons déjà évoqué, ce type d'approche permet de répondre à des demandes d'animation mais ne permet pas de tester des hypothèses sur le contrôle moteur.
- un modèle fondé sur la bibliothèque MKM présentée au chapitre 3 et qui avait été valorisé dans un projet RIAM "AVA MOTION" (financé par le Centre National de Cinématographie et le Ministère des Finances). L'un des buts de ce projet était de proposer un modèle paramétrable de locomotion qui puisse prendre en entrée des trajectoires de référence (soit obtenues expérimentalement, soit conçues par un animateur professionnel) pour une marche en ligne droite, la configuration de l'environnement et une trajectoire planifiée au sol (calculée par notre partenaire industriel KINEO-CAM). La société du domaine multimédia Dæsign disposait alors d'un module de locomotion pouvant s'adapter à différents sols, à des trajectoires complexes tout en préservant au mieux le style contenu dans le mouvement de référence. Comme nous l'avons vu, MKM permet de tester quelques hypothèses lorsque plusieurs solutions mathématiques s'offrent à lui. Cependant, il ne permet pas de calculer un mouvement de locomotion sans disposer de trajectoires de référence.
- le modèle présenté dans ce chapitre qui répond particulièrement à un problème d'analyse/synthèse du mouvement. L'approche développée ici s'inscrit tout à fait dans la figure 2.1 décrite en préambule. On dispose de données ostéologiques (ou d'hypothèses de reconstruction pour les espèces fossiles), d'hypothèses sur le placement

des empreintes et la durée d'un cycle et on cherche à calculer une locomotion. Ces hypothèses conduisent à un modèle que l'on souhaite simuler, comme le propose le synopsis de la figure 2.1. Parmi l'ensemble des solutions possibles, on sélectionne celle qui vérifie des critères généraux du contrôle moteur. Nous avons testé la minimisation du travail des forces internes et du Jerk, mais il serait possible d'envisager d'autres critères, comme les lois de covariance planaire [Bianchi 98] ou les travaux fondés sur des approches probabilistes [Kording 06]. Enfin, les trajectoires simulées sont confrontées à des données expérimentales pour tenter de valider les différentes hypothèses et critères choisis.

Ces travaux débouchent sur un grand nombre d'applications. Tout d'abord dans le domaine du multimédia et de la réalité virtuelle, il contribue à comprendre les critères à prendre en compte pour synthétiser des humanoïdes réalistes. Comme nous venons de le voir, nous proposons d'ailleurs des modules d'animation qui vont dans ce sens et qui ont déjà donné lieu à des transferts industriels. Ces méthodes doivent aussi aider à proposer des connaissances fondamentales sur le contrôle moteur, aussi bien en biomécanique, en neurosciences et même en paléanthropologie. Nous n'avons pas la prétention d'avoir apporté pour l'instant de connaissances fondamentales mais nous tentons de proposer des outils originaux pouvant aider à effectuer ce type de recherche.

Une autre application concerne le handicap moteur. Une thèse a débuté au laboratoire il y a deux ans pour développer des outils similaires mais pouvant intégrer des contraintes liées à certains handicaps. Des premiers résultats prometteurs ont été obtenus sur des sujets hémiplésiques spastiques (présentant une exagération du réflexe de contraction) que nous avons modélisés avec la même méthode que celle présentée dans ce chapitre. De la même manière que dans la section 5.3.1, seule la poulaine de chaque sujet est connue. La spasticité est modélisée par une butée articulaire et une limitation de la vitesse de flexion qui influencent donc le processus de cinématique inverse. Les résultats préliminaires sont prometteurs et montrent des trajectoires mesurées relativement proches de celles obtenues par simulation [Fusco 05]. Il reste encore beaucoup de travail pour réellement démontrer formellement l'intérêt de ce type d'approche mais les résultats préliminaires sont encourageants.

A l'avenir, cette méthode doit pouvoir tenir compte de contraintes dynamiques comme l'équilibre lors de la marche ou le calcul des forces mises en jeu à chaque articulation. En commun avec les perspectives énoncées pour *MKM*, nous lançons actuellement une collaboration avec T. Komura de l'université d'Edinburgh afin de traiter ces différents problèmes. L'objectif est de pouvoir gérer l'équilibre dynamique de la créature en utilisant, par exemple, le *Zero Moment Point* qui matérialise le point où la résultante des moments externes est nulle. Nous souhaitons aussi coupler un système dynamique capable de filtrer les mouvements obtenus afin qu'ils vérifient les lois de la mécanique. Comme nous l'avons évoqué, ces points sont abordés à la fois pour enrichir *MKM* et pour apporter un support à l'évaluation d'hypothèses portant sur ces aspects dynamiques.

Chapitre 6

Conclusion et perspectives

Mes travaux passés et en cours s'inscrivent dans le principe du couplage entre l'analyse et la synthèse du mouvement, comme l'illustre la figure 2.1. Comme nous l'avons déjà vu, il n'existe que peu de travaux qui cherchent à réellement coupler les approches issues des sciences et techniques (et plus particulièrement l'informatique graphique) et des sciences expérimentales. Rappelons que le principal problème consiste à définir un modèle capable de s'adapter à plusieurs niveaux de contrôle et permettant de tester plusieurs types d'hypothèses, sans avoir à reconcevoir le système complet pour chacune d'entre elles. Les travaux présentés dans ce document ont permis de définir des méthodes de simulation pouvant justement être utilisées pour la compréhension du mouvement humain. Les principales contributions portent sur une architecture de simulation basée sur l'adaptation de mouvements capturés (chapitre 3), la définition d'un protocole pour la validation utilisant l'immersion de sujets en réalité virtuelle (chapitre 4) et d'une méthode de génération de locomotions probables à partir de données anatomiques (chapitre 5). Le principe général est bien de proposer un aller-retour entre des analyses de données expérimentales qui permettent de proposer des hypothèses sur le contrôle moteur et des simulations qui fournissent une vue simplifiée de notre compréhension d'un phénomène donné. Séparément, ces deux approches ont été explorées très largement dans les différentes disciplines. Cependant, aborder systématiquement le problème du mouvement humain à partir de cet aller-retour entre les deux approches est moins répandu. Ceci a permis de valoriser les travaux de recherche dans différents domaines très éloignés à la base : biomécanique, neurosciences, informatique, robotique et handicap.

Comme nous l'avons vu dans ce document, il existe de nombreux niveaux possibles de modélisation du contrôle moteur humain. Pour chaque niveau de la hiérarchie décrite en figure 1.1, il est possible de proposer une nouvelle décomposition. Pour le niveau biomécanique, par exemple, les modèles peuvent aller d'une simple description de squelette en corps rigides articulés à des mécanismes très précis de la transformation d'ATP en travail mécanique. Rien que le niveau biomécanique peut se décomposer en plusieurs sous-niveaux qui peuvent être analysés séparément ou en relation les uns avec les autres. Nous avons vu dans ce document qu'il existait des méthodes de simulation se basant sur une description complète du système musculosquelettique [Delp 90] associée à des calculs de

coût métabolique en appliquant des régressions linéaires [Ma 91, Alexander 97].

Même s'il existe des travaux couplant un ou deux de ces niveaux, il est impossible, au sein même du niveau biomécanique, de proposer un modèle allant d'une description des trajectoires articulaires à la transformation d'énergie chimique dans les muscles pour tout type de mouvement. Comme nous l'avons vu, les modèles proposés dans les sciences expérimentales et en simulation s'appuient donc sur une description relativement précise d'un niveau de contrôle sans prendre en compte les autres phénomènes. Dans certains cas cependant, cette hypothèse n'est plus possible. Par exemple, les modèles cinématiques trouvent rapidement leurs limites lorsque les lois de la mécanique jouent un rôle prépondérant dans la génération du mouvement. Les modèles dynamiques échouent parfois aussi à transcrire toutes les subtilités du mouvement humain, que nous avons regroupées sous le terme de style. Ce style est en partie influencé par l'état mental du sujet et fait appel à des niveaux cognitifs (cf. figure 1.1) du contrôle moteur que nous n'avons pas abordé dans ce travail.

Comme beaucoup de travaux récents en simulation [Gleicher 97, Kovar 02, Lee 02], dans le chapitre 3, nous avons choisi de nous reposer sur des mouvements capturés. L'hypothèse est qu'une adaptation de mouvements peut plus sûrement produire des gestes naturels que des méthodes cherchant à modéliser tous les niveaux de contrôle. Il existe des méthodes relativement bien définies pour tenir compte de contraintes cinématiques et dynamiques mais la gestion du style pose encore de nombreux problèmes. C'est donc une approche prometteuse pour tester des hypothèses se traduisant par des contraintes cinématiques et dynamiques. On suppose ainsi que les niveaux inférieurs ne sont pas altérés par le processus d'adaptation à ces nouvelles contraintes.

Notre outil logiciel *MKM* offre un environnement de simulation qui peut être utilisé sans aucune nouvelle hypothèse. Dans ce cas, le mouvement est calculé en tenant compte de contraintes cinématiques, cinétiques et d'hypothèses directement introduites dans *MKM*. L'une de ces hypothèses est l'ordre dans lequel s'effectue la mobilisation des segments pour résoudre des contraintes cinématiques et cinétiques. Cet ordre a été défini afin de minimiser l'énergie mise en jeu. Pour certains mouvements rapides, cet ordre pourrait être remis en question, comme nous l'avons montré pour le tir au handball [Fradet 04]. Au sein de *MKM* il serait alors envisageable de tester plusieurs types d'organisations segmentaires pour déterminer l'influence réelle sur la performance sportive. De même, nous avons appliqué plusieurs contraintes sur les limites angulaires et ajouté une notion de souplesse [Kulpa 05a] qui contrôle la capacité d'un humanoïde à toucher le sol sans plier les genoux. Il est possible d'imaginer un grand nombre d'autres hypothèses cinématiques et de tester leur influence sur le mouvement calculé. Toute loi des sciences expérimentales qui peut s'exprimer sous une forme de contrainte cinématique ou cinétique peut ainsi être testée. Comme nous l'avons déjà précisé, il reste maintenant à définir des méthodes de calcul capables de gérer les contraintes dynamiques pour étendre ces possibilités.

Même si *MKM* semble répondre à un grand nombre de problèmes, il reste à l'utiliser en grandeur réelle avec plusieurs autres lois du contrôle moteur. Cette validation à grande échelle est nécessaire pour définir les limites au-delà desquelles ce type d'approche n'est plus adapté. Par exemple, la résolution des contraintes cinématiques grâce à un processus itératif peut trouver des limites pour certaines hypothèses travaillant sur les accélérations ou la minimisation explicite de critères énergétiques ou du Jerk [Flash 85]. De même, les algorithmes de synchronisation se focalisent sur les appuis au sol alors que d'autres événements

peuvent conduire à des incohérences. L'opérateur de synchronisation défini dans *MKM* doit donc être étendu et généralisé pour prendre en compte différents types d'événements. C'est un problème difficile à résoudre mais qui peut trouver sa solution dans les approches issues de l'animation comportementale [Donikian 04]. Dans ces approches, l'une des problématiques est de gérer différentes ressources pour effectuer une tâche complexe. Cette problématique n'est finalement pas tellement éloignée.

Aussi bien pour les problèmes de combinaison que de comparaison de gestes, l'un des challenges est de disposer d'une métrique capable de retourner une distance entre deux mouvements. Comme nous l'avons vu, cette métrique n'est pas facile à définir vu le caractère multidimensionnel du mouvement : un grand nombre de degrés de libertés qui évoluent sur plusieurs pas de temps. Le chapitre 4 élude le problème en définissant un protocole de validation fondé sur les perceptions de sujets devant interagir avec des entités synthétiques. Cependant, l'évaluation de la tâche réalisée par les sujets implique de comparer leur gestuelle à celle qu'ils adoptent en situation réelle. Encore une fois, on retrouve ce problème de distance entre mouvements. Dans l'application au handball, le problème est plus simple car on dispose de connaissances sur les éléments clés de la parade d'un gardien. Ceci permet de limiter l'espace des paramètres à comparer. Cependant, pour généraliser cette approche, il ne sera plus possible d'éluder le problème de la définition d'une métrique pertinente. Des travaux récents publiés en informatique graphique [Muller 05] définissent des "gabarits" représentant la vérification ou non de contraintes cinématiques pour chaque mouvement capturé. Ainsi, pour chaque contrainte définie, chaque mouvement indique s'il la vérifie ou non pour tous les pas de temps. Ceci permet d'associer indirectement une sémantique au mouvement. Par exemple, une contrainte portant sur l'éloignement du poignet droit vers l'avant permet de rechercher rapidement tous les gestes qui correspondent. Comparer deux mouvements revient ensuite à vérifier s'ils appartiennent à la même classe de résolution de contraintes.

Ces approches prometteuses fournissent une métrique haut niveau mais ne permettent pas des comparaisons fines de gestes. Ainsi, deux gestes ayant des styles radicalement différents mais appartenant à la même classe peuvent être vus comme identiques avec cette approche. Là aussi, il semble qu'il faille adopter une approche à plusieurs niveaux pour comparer globalement deux mouvements, puis à raffiner la comparaison jusqu'au niveau de précision que l'on souhaite atteindre. Quelques travaux dans ce sens ont été initiés par Benoît Bideau, du LPBEM, mais il reste encore beaucoup à faire pour proposer une méthode robuste et générique. Ce problème est commun à toutes les disciplines scientifiques s'intéressant au mouvement humain et qui doivent organiser une base de données de mouvements pour en tirer des fondements communs, des différences entre groupes ou des adaptations particulières.

Les méthodes de demain devront être aussi capables de s'adapter au niveau de détail qui est nécessaire pour expérimenter des hypothèses sur le contrôle moteur. Ainsi, ces outils doivent pouvoir proposer des simulateurs pertinents que l'on travaille d'un point de vue global sur le corps humain (pour gérer ses déplacements par exemple) ou en se focalisant sur une partie plus détaillée de son squelette (pour gérer le lien entre anatomie et fonction motrice par exemple). Aujourd'hui, il est nécessaire de reprendre complètement les outils suivant la problématique à résoudre. Il faudrait tendre vers la définition d'un humain virtuel adaptable et ouvert à l'expérimentation de lois de contrôle à tous les niveaux (globaux à

locaux). C'est un challenge qui nécessite une collaboration très forte entre les différentes disciplines. Les travaux menés en collaboration avec des paléoanthropologues pour la simulation de la locomotion bipède nous ont donné une expérience sur le problème de communication entre deux disciplines très éloignées. Cela demandera donc encore beaucoup de temps et un grand nombre d'étapes avant de mettre en œuvre une hiérarchie complète et cohérente de contrôleurs pour le mouvement humain. L'un des points clés est la gestion de la cohérence entre les niveaux. On peut rêver à un humanoïde synthétique en mouvement pour lequel la simulation pourrait changer de niveau de description en temps réel, un peu comme les représentations anatomiques où on peut successivement enlever la peau, puis les différents tissus pour finalement ne visualiser que les os. Pour le mouvement, on pourrait imaginer une simulation de trajectoires locomotrices s'inspirant de lois du type "lois de puissance" [Vieilledent 01] qui piloterait à un niveau inférieur un autre modèle, sur les membres inférieurs, en respectant la loi de covariance planaire [Bianchi 98], pour aller jusqu'à l'activation des muscles. Le principal challenge est d'assurer la cohérence entre les simulations produites à chaque niveau.

Bien évidemment, tous ces travaux débouchent sur un grand nombre d'applications comme l'animation de personnages dans le domaine multimédia ou l'assistance à la préparation physique dans les clubs sportifs. Ainsi, un même modèle théorique peut être valorisé par un transfert vers les sciences expérimentales, vers la formation à la maintenance dans les grandes industries, vers l'aide à la définition de programmes d'entraînement sportif ou vers des outils pédagogiques pour l'enseignement en STAPS.

Bibliographie

- [Alain 90] C. Alain & C. Sarrazin. *Sport skill analysis : A simulation study of a decision making model of squash competition*. Canadian journal of applied sport sciences, vol. 3, pages 195–200, 1990.
- [Aleshinsky 86a] S.Y. Aleshinsky. *An Energy sources and fractions approach to the mechanical energy expenditure problem - I. Basic concepts , description of the model, analysis of a one-link system movement*. Journal of Biomechanics, vol. 19, no. 4, pages 287–293, 1986.
- [Aleshinsky 86b] S.Y. Aleshinsky. *An Energy sources and fractions approach to the mechanical energy expenditure problem - II. Movement of the multi-link chain model*. Journal of Biomechanics, vol. 19, no. 4, pages 295–300, 1986.
- [Aleshinsky 86c] S.Y. Aleshinsky. *An energy sources and fractions approach to the mechanical energy expenditure problem ? III. Mechanical energy expenditure reduction durink one link motion*. Journal of Biomechanics, vol. 19, no. 4, pages 301–306, 1986.
- [Aleshinsky 86d] S.Y. Aleshinsky. *An energy sources and fractions approach to the mechanical energy expenditure problem- IV. Criticism of the concept of energy transfers within and between links*. Journal of Biomechanics, vol. 19, no. 4, pages 307–309, 1986.
- [Aleshinsky 86e] S.Y. Aleshinsky. *An Energy sources and fractions approach to the mechanical energy expenditure problem -V. The mechanical energy expenditure reduction during motion of the multi-link system*. Journal of Biomechanics, vol. 19, no. 4, pages 311–315, 1986.
- [Alexander 83] R.M. Alexander. *Animal mechanics*. Blackwell, Oxford, 1983.
- [Alexander 84] R.M. Alexander. *Walking and Running*. American Scientist, vol. 72, no. 348-354, 1984.
- [Alexander 92] R.M. Alexander. *A model of bipedal locomotion on compliant legs*. Phil. Trans. Roy. Soc. Lond. (B), pages 189–198, 1992.
- [Alexander 97] R.M. Alexander. *A minimum energy cost hypothesis for human arm trajectories*. Biological Cybernetics, vol. 76, pages 97–105, 1997.
- [Alexander 04] R.M. Alexander. *Bipedal animals, and their differences from humans*. Journal of Anatomy, vol. 204, no. 5, pages 321–330, 2004.

-
- [Amaya 96] K. Amaya, A. Bruderlin & T. Calvert. *Emotion from motion*. In Proceedings of Graphics Interface'96, pages 222–229, 1996.
 - [Arechavaleta 04] G. Arechavaleta, C. Esteves & JP. Laumond. *Planning Fine Motions for a Digital Factotum*. In Proceedings of IROS'04, 2004.
 - [Arikan 05] O. Arikan, D.A. Forsyth & J. F. O'Brien. *Pushing people around*. In SCA '05 : Proceedings of the 2005 ACM SIGGRAPH/Eurographics symposium on Computer animation, pages 59–66, 2005.
 - [Arnaldi 89] B. Arnaldi. *Conception du noyau d'un système d'animation de scènes tridimensionnelles intégrant les lois de la mécanique*. PhD thesis, Université de Rennes 1, 1989.
 - [Ashraf 00] G. Ashraf & K.C. Wong. *Generating consistent motion transition via framespace interpolation*. Eurographics, Computer Graphics Forum, vol. 19, no. 3, August 2000.
 - [Ashraf 01] G. Ashraf & K.C. Wong. *Constrained Framespace Interpolation*. Computer Animation 2001, pages 61–72, November 2001.
 - [Badler 91] N. I. Badler, B. A. Barsky & D. Zeltzer. *Making them move*. Morgan Kaufmann Publisher, 1991.
 - [Baerlocher 04] P. Baerlocher & R. Boulic. *An inverse kinematic architecture enforcing on arbitrary number of strict priority levels*. The Visual Computer, vol. 20, no. 6, pages 402–417, august 2004.
 - [Barfield 93] W. Barfield & S. Weghorst. *Human-computer interaction : software and hardware interfaces (b), chapitre The sense of presence within virtual environments : a conceptual framework*. Salvendy & Smith, 1993.
 - [Beaupied 03] H. Beaupied, F. Multon & P. Delamarche. *Does training have consequences for the walk-run transition speed ?* Human Movement Science, vol. 22, pages 1–12, 2003.
 - [Bendahan 04] P. Bendahan & P. Gorce. *A neural network architecture to learn the arm reach motion planning in a static cluttered environment*. In Proceedings IEEE Conference on Systems, Mans and Cybernetics, volume 1, pages 732–767, 2004.
 - [Berillon 05] G. Berillon, G. Nicolas, F. Multon, F. Marchal, G. Dumont, Y. Deloison & D. Gommery. *Testing locomotor hypothesis in early hominids : 3D modeling and simulation of bipedalisms using anatomical data*. American Journal of Physical Anthropology, vol. 106, no. S 40, page 73, 2005.
 - [Bernstein 67] N.A. Bernstein. *The co-ordination and regulation of movements*. Pergamon Press, Oxford, 1967.
 - [Berthoz 97] A. Berthoz. *Le sens du mouvement*. Odile Jacob, 1997.
 - [Berthoz 03] A. Berthoz. *La décision*. Odile Jacob, 2003.
 - [Bianchi 98] L. Bianchi, D. Angelini, G.P. Orani & F. Lacquaniti. *Kinematic coordination in human gait : relation to mechanical energy cost*. Journal of Neurophysiology, vol. 79, pages 2155–2170, 1998.

-
- [Bideau 03a] B. Bideau. *La réalité virtuelle pour l'analyse des duels sportifs : application au duel entre un gardien et un tireur au handball*. PhD thesis, Université Rennes 2, 2003.
 - [Bideau 03b] Benoit Bideau, Richard Kulpa, Stephane Menardais, Laetitia Fradet, Franck Multon, Paul Delamarche & Bruno Arnaldi. *Real handball goalkeeper vs. virtual handball thrower*. Presence : Teleoper. Virtual Environ., vol. 12, no. 4, pages 411–421, 2003.
 - [Bideau 04a] B. Bideau, F. Multon, R. Kulpa, L. Fradet & B. Arnaldi. *Virtual reality applied to sports : do handball goalkeepers react realistically to simulated synthetic opponents ?* In Proceedings of ACM, SIGGRAPH VRCAI, pages p210–216, 2004.
 - [Bideau 04b] B. Bideau, F. Multon, R. Kulpa, L. Fradet, B. Arnaldi & P. Delamarche. *Virtual reality, a new tool to investigate anticipation skills : application to the goalkeeper and handball thrower duel*. Neuroscience letters, vol. 372, no. 1-2, pages 119–122, 2004.
 - [Bodenheimer 97] B. Bodenheimer, C. Rose, S. Rosenthal & J. Pella. *The Process of Motion Capture : Dealing with the Data*. In Eurographics Workshop on Computer Animation and Simulation, pages 3–18, September 1997.
 - [Bodenheimer 99] B. Bodenheimer, A.V. Shleyfman & J.K. Hodgins. *The Effects of Noise on the Perception of Animated Human Running*. In Proceedings of Computer Animation and Simulation '99, Eurographics Animation Workshop, pages 53–63, 1999.
 - [Boulic 90] R. Boulic, N. Magnenat-Thalmann & D. Thalmann. *A global human walking model with real-time kinematic personification*. Visual Computer, vol. 6, no. 6, pages 344–358, December 1990.
 - [Boulic 92] R. Boulic & D. Thalmann. *Combined Direct and Inverse Kinematic Control for Articulated Figure Motion Editing*. Computer Graphics Forum, vol. 2, no. 4, October 1992.
 - [Boulic 96] R. Boulic, R. Mas & D. Thalmann. *A Robust Approach for the Center of Mass Position Control with Inverse Kinetics*. Journal of Computers and Graphics, vol. 20, no. 5, 1996.
 - [Brand 00] M. Brand & A. Hertzmann. *Style machines*. In Proceedings of the 27th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, pages 183–192. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., 2000.
 - [Brogan 98] D.C. Brogan, R.A. Metoyer & J.K. Hodgins. *Dynamically Simulated Characters in Virtual Environments*. IEEE Computer Graphics and Applications, vol. 15, no. 5, pages 58–69, 1998.
 - [Bruderlin 89] A. Bruderlin & T. Calvert. *Goal-Directed, Dynamic Animation of Human Walking*. In Proceedings of ACM SIGGRAPH, pages 233–242. Addison Wesley, July 1989.
 - [Burdett 83] R.G. Burdett, G.S. Skrinar & S.R. Simon. *Comparison of mechanical work and metabolic energy consumption during normal gait*. Journal of orthopaedic research, vol. 1, pages 63–72, 1983.

-
- [Cadoz 94] C. Cadoz. *Les réalités virtuelles*. Dominos, Flammarion, 1994.
- [Caldwell 92] G.E. Caldwell & L.W. Forrester. *Estimates of mechanical work and energy transfers : demonstration of a rigid body power model of the recovery leg in gait*. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, vol. 24, no. 12, pages 1396–1412, 1992.
- [Cao 03] Y. Cao, P. Faloutsos & F. Pighin. *Unsupervised learning for speech motion editing*. In *Proceedings of ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation*, pages 225–231, 2003.
- [Carey 05] T.S. Carey & R.H. Crompton. *The metabolic costs of "bent-hip, bent-knee" walking in humans*. *Journal of Human Evolution*, vol. 48, pages 25–44, 2005.
- [Cavagna 77] G.A. Cavagna & M. Kaneko. *Mechanical work and efficiency in level walking and running*. *Journal of Physiology (London)*, vol. 268, pages 467–481, 1977.
- [Chaigneau 92] F. Chaigneau, P. Delamarche & M. Levasseur. *Stroboscopic computerized determination of humeral rotation in overarm throwing*. *British Journal of Sport Medicine*, vol. 26, pages 59–62, 1992.
- [Chandler 75] R.F. Chandler, C.E. Clauser, J.T. McConville, H.M. Reynolds & J.M. Young. *Investigation of inertial properties of the human body*. Rapport technique NTIS No. AD-A016-485, AMRL Technical report, Wright-Patterson Air Force Base, Ohio, 1975.
- [Chi 00] D.M. Chi, M. Costa, L. Zhao & N.I. Badler. *The EMOTE model for effort and shape*. In *Proceedings of ACM SIGGRAPH*, pages 173–182. Addison Wesley, 2000.
- [Choi 03] M. Choi, J. Lee & S. Shin. *Planning biped locomotion using motion capture data and probabilistic roadmaps*. *ACM Transactions on Graphics*, vol. 22, no. 2, pages 182–203, 2003.
- [Clauser 69] C.E. Clauser, J.T. McConville & J.W. Young. *Weight, volume and center of mass of segments of the human body*. Rapport technique NTIS No. AD-710-622, AMRL Technical report, Wright-Patterson Air Force Base, Ohio., 1969.
- [Cohen 92] M. Cohen. *Interactive Spacetime Control for Animation*. *Proceedings of ACM SIGGRAPH '92*, vol. 26, pages 293–302, July 1992. Chicago, Illinois.
- [Cottin 89] J. Cottin. *Handball : la préparation à agir du gardien de but : analyse chronométrique des actions de parade en situation de terrain*. Mémoire de l'INSEP, Paris, 1989.
- [Cozot 99] R. Cozot, F. Multon, B. Valton & B. Arnaldi. *Animation Levels of Detail Design for Real-Time Virtual Human*. *Computer Animation and Simulation'99*, pages 35–44, May 1999.
- [Craig 06] C.M. Craig, E. Berton, G. Rao, L. Fernandez & R.J. Bootsma. *Judging where a ball will go : the case of curved free kicks in football*. *Naturwissenschaften*, vol. 93, no. 2, pages 97–101, 2006.

-
- [Crompton 98] R.H. Crompton, Y. Li, W. Weijie, M. Gunther & R. Savage. *The mechanical effectiveness of erect and "bent-hip, bent-knee" bipedal walking in Australopithecus afarensis*. Journal of Human Evolution, vol. 35, pages 55–74, 1998.
- [Delp 90] S.L. Delp, J.P. Loan, M.G. Hoy, F.E. Zajac, E.L. Topp & J.M. Rosen. *interactive graphics-based model of the lower extremity to study orthopaedic surgical procedures*. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, vol. 37, pages 757–767, 1990.
- [Delp 95] S. Delp & J.P. Loan. *A software system to develop and analyze models of musculoskeletal structures*. Computers in Biology and Medicine, vol. 25, pages 21–34, 1995.
- [Dempster 55] W.T. Dempster. *Space requirements for the seated operator*. Rapport technique, WADC Technical report, -Patterson Air Force based, OH : Wright Air development Centre, 1955.
- [Derrider 85] M. Derrider. Recherche en aps, volume 1, chapitre Enregistrement et analyse des comportements exploratoires visuels du gardien de but en situation de pénalty, pages 259–272. Paris : Actio / Université Aix-Marseille II, 1985.
- [Donikian 04] S. Donikian. *Modélisation, contrôle et animation d agents virtuels autonomes évoluant dans des environnements informés et structurés*. PhD thesis, Habilitation à Diriger des Recherches de l'Université Rennes 1, 2004.
- [Dumont 90] G. Dumont. *Animation de scènes tridimensionnelles : la mécanique des solides comme modèle de synthèse du mouvement*. PhD thesis, Université de Rennes 1, 1990.
- [Durocher 06a] C. Durocher. *Analyse, modélisation et simulation de l'impulsion au sol dans les activités physiques*. PhD thesis, Université Rennes 2, septembre 2006.
- [Durocher 06b] C. Durocher, F. Multon & R. Kulpa. *Dynamic control of captured motions to verify new constraints*. Lecture Notes in Computer Science, vol. LNCS-LNAI 3881, pages 200–211, 2006. Proceedings of Gesture Workshop 2005.
- [Esteves 06] C. Esteves, G. Arechavaleta, J. Pettre & J.P. Laumond. *Animation Planning for Virtual Characters Cooperation*. ACM Trans. on graphics, vol. (In Press), 2006.
- [Fang 03] A. Fang & N. Pollard. *Efficient synthesis of physically valid human motion*. In Proceedings of ACM SIGGRAPH, volume 22, pages 417–426, 2003.
- [Flash 85] T. Flash & N. Hogan. *The coordination of arm movements : An experimentally confirmed mathematical model*. Journal of Neuroscience, vol. 5, pages 1688–1703, 1985.

-
- [Forbes 05] K. Forbes & E. Fiume. *An efficient search algorithm for motion data using weighted PCA*. In Proceedings of ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation, pages 67–76, 2005.
 - [Fradet 03] L. Fradet, R. Kulpa, B. Bideau, F. Multon & P. Delamarche. *Kinematic simulation of handball throwing*. In , Proceedings of European Simulation Multiconference, 2003.
 - [Fradet 04] L. Fradet, M. Botcazou, C. Durocher, A. Cretual, F. Multon, J. Prioux & P. Delamarche. *Do handball throws always exhibit a proximal to distal segmental sequence ?* Journal of Sports Sciences, vol. 22, no. 5, pages 439–447, 2004.
 - [Fusco 05] N. Fusco, F. Multon, G. Nicolas & A. Cretual. *Simulation of hemiplegic subjects' locomotion*. Lecture Notes in Computer Science, vol. LNCS-LNAI 3881, pages 236–247, 2005.
 - [Girard 85] M. Girard & A.A. Maciejewski. *Computational Modeling for the Computer Animation of Legged Figures*. In Proceedings of ACM SIGGRAPH, pages 263–270. Addison Wesley, July 1985.
 - [Glardon 04] P. Glardon, R. Boulic & D. Thalmann. *PCA-based walking engine using motion capture data*. In Proceedings of IEEE CGI, pages 292–298, Crete, Greece, June 2004.
 - [Gleicher 97] M. Gleicher. *Motion editing with spacetime constraints*. In In Proceedings of Symposium on Interactive 3D Graphics, pages 139–148, 1997.
 - [Gleicher 98a] M. Gleicher. *Retargetting Motion to new Characters*. In Proc. of ACM SIGGRAPH, pages 33–42, July 1998.
 - [Gleicher 98b] M. Gleicher & P. Litwinowicz. *Constraint-Based Motion Adaptation*. Journal of Visualization and Computer Animation, vol. 9, no. 2, pages 65–94, 1998.
 - [Gleicher 03] M. Gleicher, H.J. Shin, L. Kovar & A. Jepsen. *Snap together motion : Assembling run-time animation*. In Proceedings of Symposium on Interactive 3D Graphics, 2003.
 - [Grasso 99] R. Grasso, A. Peppe, F. Stratta, D. Angelini, M. Zago, P. Stanzione & F. Lacquaniti. *Basal ganglia and gait control : apomorphine administration and internal pallidum stimulation in Parkinson's disease*. Exp Brain Res, vol. 126, no. 2, pages 138–148, 1999.
 - [Gray 18] H. Gray, editeur. *Anatomy of the human body*. Lea & Febiger, 1918.
 - [Gribble 96] P.L. Gribble & D.J. Ostry. *Origins of the power law relation between movement velocity and curvature : modeling the effects of muscle mechanics and limb dynamics*. J Neurophysiol., vol. 76, no. 5, pages 2853–2860, 1996.
 - [Guo 96] S. Guo & J. Robergé. *A high-level control mechanism for human locomotion based on parametric frame space interpolation*. In Proceedings of the Eurographics workshop on Computer animation and simulation '96, pages 95–107. Springer-Verlag New York, Inc., 1996.

-
- [H-ANIM 01] H-ANIM. *Human animation Working Group*. <http://www.h-anim.org>, 2001.
 - [Hartenberg 64] R.S. Hartenberg & J. Denavit. *Kinematic synthesis of linkages*. McGraw-Hill Book Co., New York, 1964.
 - [Heloir 06a] A. Heloir, N. Courty, S. Gibet & F. Multon. *Temporal alignment of communicative gesture sequences*. *Computer animation and virtual worlds*, vol. 17, no. 3+4, pages 347–358, 2006.
 - [Heloir 06b] A. Heloir, S. Gibet, F. Multon & N. Courty. *Captured Motion Data Processing for Real Time Synthesis of Sign Language*. *Lecture Notes in Computer Science*, vol. LNCS-LNAI 3881, pages 168–171, 2006.
 - [Herda 00] L. Herda, R. Pläenkers, P. Fua, R. Boulic & D. Thalmann. *Skeleton-Based Motion Capture for Robust Reconstruction of Human Motion*. *Proc. of Computer Animation'2000*, May 2000.
 - [Herda 01] L. Herda, P. Fua, R. Pläenkers, R. Boulic & D. Thalmann. *Using Skeleton-Based Tracking to Increase the Reliability of Optical Motion Capture*. *Human Movement Science Journal*, 2001.
 - [Hicheur 05a] H. Hicheur, S. Vieilledent & A. Berthoz. *Head motion in humans alternating between straight and curved walking path : Combination of stabilizing and anticipatory orienting mechanisms*. *Neuroscience Letters*, vol. 383, pages 87–92, 2005.
 - [Hicheur 05b] H. Hicheur, S. Vieilledent, M.J.E. Richardson, T. Flash & A. Berthoz. *Velocity and Curvature in Human Locomotion Along Complex Curved Paths : A Comparison with Hand Movements*. *Exp. Brain Res*, vol. 162, no. 2, pages 145–154, 2005.
 - [Hicheur 06] H. Hicheur, AV. Terekhov & A. Berthoz. *Intersegmental coordination during human locomotion : does planar covariation of elevation angles reflect central constraints ?* *J Neurophysiol*, vol. 96, no. 3, 1406–1419 2006.
 - [Hodgins 95] J. Hodgins. *Animating Human Athletics*. *Proceeding of ACM SIGGRAPH'95*, August 1995. Los Angeles, California.
 - [Hodgins 96] J. Hodgins. *Three-Dimensional Human Running*. *Proceedings of the IEEE Conference on Robotics and Automation*, April 1996. Minneapolis, Minnesota.
 - [Hodgins 97a] J.K. Hodgins, J.F. O'Brien & J. Tumblin. *Do Geometric Models Affect Judgments of Human Motion*. In *Proceedings of Graphics Interface'97*, pages 17–25, 1997.
 - [Hodgins 97b] J.K. Hodgins & N.S. Pollard. *Adapting Simulated Behaviors For New Characters*. In *Proceedings of ACM SIGGRAPH*, Los Angeles, California, August 1997. Addison Wesley.
 - [Hreljac 93] A. Hreljac. *Preferred and energetically optimal gait transition speeds in human locomotion*. *Medicine and Sciences in Sports and Exercise*, vol. 25, no. 10, pages 1158–1162, 1993.

-
- [Hsu 05] E. Hsu, K. Pulli & F. Popovic. *Style translation for human motion*. ACM Trans. on Graphics, vol. 24, no. 3, pages 1082–1089, 2005.
 - [Huys 04] R. Huys, A. Daffertshofer & P.J. Beek. *Multiple time scales and multi-form dynamics in learning to juggle*. Motor Control, vol. 8, no. 2, pages 188–212, 2004.
 - [Imai 01] T. Imai, ST. Moore, T. Raphan & B. Cohen. *Interaction of the body, head, and eyes during walking and turning*. Exp Brain Res., vol. 136, no. 1, pages 1–18, 2001.
 - [Jensen 78] R.K. Jensen. *Estimation of the biomechanical properties of three body types using a photogrammetric method*. Journal of Biomechanics, vol. 11, pages 349–358, 1978.
 - [Johansson 73] G. Johansson. *Visual perception of biological motion and a model for its analysis*. Perception and Psychophysics, vol. 14, pages 201–211, 1973.
 - [Joris 85] H.J.J. Joris, A.A.J. Van Muyen & G.J. Van Ingen Schenau H.C.G Kemper. *Force, Velocity and energy flow during the overarm throw in female handball players*. Journal of Biomechanics, vol. 18, no. 6, pages 409–414, 1985.
 - [Juillard 99] F. Juillard & S. Gibet. *REACTIVA : Motion synthesis based on a reactive representation in Gesture and Sign Language*. In S. Gibet J. Richardson D. Teil A. Braffort R. Gherbi, editeur, Lecture Notes in Artificial Intelligence, numéro 1739 in Gesture-Based Communication in Human-Computer Interaction, Gif-sur-Yvette (France), 1999. Springer Verlag.
 - [Kavraki 96] L.E. Kavraki, P. Svestka, J.C. Latombe & M. Overmars. *Probabilistic roadmaps for path planning in high-dimensional configuration spaces*. IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol. 12, no. 4, pages 566–580, 1996.
 - [Keller 87] D. Keller, M. Goetz & M.C. Henneman. *Ajustements duels spécifiques en sports de balle*. STAPS, vol. 15, pages 31–38, 1987.
 - [Kingma 95] I. Kingma, H. M. Toussaint, D.A Commissaris, MJ. Hoozemans & J.O. Ober. *Optimizing the determination of the body center of mass*. Journal of Biomechanics, vol. 29, pages 1137–1142, 1995.
 - [Komura 05] T. Komura, E/S/L/ Ho & R.W.H. Lau. *Animating reactive motion using momentum-based inverse kinematics*. Computer Animation and Virtual Worlds, vol. 16, pages 213–223, 2005.
 - [Kording 06] K.P. Kording & D.M. Wolpert. *Bayesian decision theory in sensorimotor control*. Trends Cogn Sci., vol. 10, no. 7, pages 319–326, 2006.
 - [Kovar 02] L. Kovar, M. Gleicher & F. Pighin. *Motion graphs*. In Proceedings of the 29th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, pages 473–482. ACM Press, 2002.
 - [Kovar 03] L. Kovar & M. Gleicher. *Flexible Automatic Motion Blending with Registration Curves*. pages 214–224. Eurographics Association, 2003.

-
- [Kramer 00] PA. Kramer & GG Eck. *Locomotor energetics and leg length in hominid bipedality*. Journal of Human Evolution, vol. 38, pages 651–666, 2000.
 - [Kulpa 05a] R. Kulpa. *Adaptation interactive et performante des mouvements d'humanoides synthétiques : aspects cinématiques, cinétiques et dynamiques*. PhD thesis, INSA Rennes, November 2005.
 - [Kulpa 05b] R. Kulpa & F. Multon. *fast inverse kinematics and kinetics solver for human-like figures*. In Proceedings of IEEE Humanoids, pages 38–43, Tsukuba, Japan, december 2005.
 - [Kwon 96] Y.H. Kwon. *Experimental Simulation of an Airbone Movement : Applicability of the Body Segment Parameter Estimation Methods*. Journal of Applied Biomechanics, vol. 17, no. 3, pages 232–240, 1996.
 - [Lacquaniti 83] F. Lacquaniti, C.A. Terzuolo & P. Viviani. *The law relating kinematic and figural aspects of drawing movements*. Acta Psychologica, vol. 54, pages 115–130, 1983.
 - [Lacquaniti 94a] F. Lacquaniti & C. Maioli. *Coordinate transformations in the control of cat posture*. J Neurophysiol, vol. 72, no. 4, pages 1496–1515, 1994.
 - [Lacquaniti 94b] F. Lacquaniti & C. Maioli. *Independent control of limb position and contact forces in cat posture*. J Neurophysiol, vol. 72, no. 4, pages 1476–1495, 1994.
 - [Latombe 91] J.C. Latombe. Robot motion planning. Kluwer Academic Publishers, 1991.
 - [Laumond 98] J.P. Laumond. Robot motion planning and control. Springer-Verlag, 1998.
 - [Lay 06] A.N. Lay, C.J. Hass & R.J. gregor. *The effects of sloped surfaces on locomotion : a kinematic and kinetic analysis*. Journal of Biomechanics, vol. 39, pages 1621–1628, 2006.
 - [Leakey 87] M.D. Leakey & J.M. Harris. Laetoli : a pliocene site in northern tanzania. Oxford, Oxford University Press, 1987.
 - [LeCallennec 04] B. LeCallennec & R. Boulic. *Interactive motion deformation with prioritized constraints*. In DK. Pai R. Boulic, éditeur, Proceedings of ACM/Eurographics SCA, pages 163–171, Grenoble, France, august 2004.
 - [Lee 99] J. Lee & S.Y. Shin. *A hierarchical approach to interactive motion editing for human-like figures*. Proceedings of ACM SIGGRAPH 99, pages 39–48, August 1999.
 - [Lee 02] J. Lee, J. Chai, P.S.A. Reitsma, J.K. Hodgins & N.S. Pollard. *Interactive control of avatars animated with human motion data*. In Proceedings of the 29th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, pages 491–500. ACM Press, 2002.
 - [Lee 04] J. Lee & K.H. Lee. *Precomputing avatar behavior from human motion data*. In Eurographics/ACM SIGGRAPH Symposium on Computer Animation, pages 79–87, Grenoble, France, August 2004.

-
- [Leva 96] P. De Leva. *Adjustments to Zatsiorsky-Seluyanov's segment inertia parameters*. Journal of Biomechanics, vol. 29, pages 1223–1230, 1996.
- [Liu 94] Z. Liu, S. Gorthier & M. Cohen. *Hierarchical spacetime control*. Proceedings of ACM SIGGRAPH '94, pages 35–42, July 1994. Orlando, Floride.
- [Liu 05] C.K. Liu, A. Hertzmann & Z. Popovic. *Learning physics-based motion style with nonlinear inverse optimization*. ACM Trans. on Graphics, vol. 24, no. 3, pages 1071–1081, 2005.
- [Ma 91] S. Ma & G.I. Zahalak. *A distribution-moment model of energetics in skeletal muscle*. Journal of Biomechanics, vol. 24, pages 21–35, 1991.
- [Marey 73] E.J. Marey. *La machine animale, locomotion terrestre et aérienne*. Germer Baillière, 1873.
- [Margaria 63] R. Margaria, P. Cerretelli, P. Aghemo & G. Sassi. *Energy cost of running*. Journal of Applied Physiology, vol. 18, no. 2, pages 367–370, 1963.
- [Mattson 90] E. Mattson. *Changes in walking ability after knee replacement*. Int Orthop, vol. 14, pages 277–280, 1990.
- [Ménardais 03] S. Ménardais. *Fusion et adaptation temps réel de mouvements acquis pour l'animation d'humanoïdes synthétiques*. PhD thesis, Université Rennes 1, January 2003.
- [Menardais 04a] S. Menardais, R. Kulpa, F. Multon & B. Arnaldi. *Synchronization for dynamic blending of motions*. In Proceedings of ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation, pages 325–336, Grenoble, France, August 2004.
- [Ménardais 04b] S. Ménardais, F. Multon, R. Kulpa & B. Arnaldi. *Motion blending for real-time animation while accounting for the environment*. In Computer Graphics International, June 2004.
- [Minetti 94] A.E. Minetti, L.P. Ardigo & F. Saibene. *Mechanical determinants of minimum energy cost of gradient running in humans*. Journal of Experimental Biology, vol. 195, pages 211–225, 1994.
- [Molet 96] T. Molet, R. Boulic & D. Thalmann. *A real time anatomical converter for human motion capture*. In Eurographics Workshop on Computer Animation and Simulation, pages 79–94, September 1996.
- [Molet 99] T. Molet, R. Boulic & D. Thalmann. *Human Motion Capture Driven by Orientation Measurements*. Presence, vol. 8, no. 2, pages 187–203, 1999.
- [Muller 05] M. Muller, T. Rober & M. Clausen. *Efficient content-based retrieval of motion capture data*. ACM Transactions on Graphics, vol. 24, no. 3, pages 677–685, 2005.
- [Multon 98] F. Multon. *Contrôle du Mouvement des Humanoïdes de Synthèse*. PhD thesis, Université de Rennes I, October 1998.

-
- [Muybridge 87] E. Muybridge. *Animal locomotion*. University of Pennsylvania, 1887.
 - [Myers 81] C.S. Myers & L.R. Rabiner. *A comparative study of several dynamic time-warping algorithms for connected word recognition*. The Bell system technical journal, vol. 60, no. 7, pages 1389–1409, 1981.
 - [Nagano 05] A. Nagano, B.R. Umberger, M.W. Marzke & K.G.M. Gerntsen. *Neuro-musculoskeletal computer modeling and simulation of upright, straight-legged, bipedal locomotion of Australopithecus afarensis (A.L. 288-1)*. American Journal of Physical Anthropology, vol. 126, pages 2–13, 2005.
 - [Nakamura 05] Y. Nakamura, K. Yamane, I. Suzuki & Y. Fujita. *Somatosensory computation for man-machine interface from motion-capture data and musculoskeletal human model*. IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol. 21, no. 1, pages 58–66, 2005.
 - [Newel 90] A. Newel. *Unified theories of cognition*. Harvard University Press, 1990.
 - [Ngo 93] J.T. Ngo & J. Marks. *Spacetime Constraints Revisited*. In Proceedings of ACM SIGGRAPH, pages 343–350, Anaheim, California, August 1993. Addison Wesley.
 - [Nicolas 04] G. Nicolas, F. Multon & G. Berillon. *Inverse kinematics for the calculation of plausible bipedal locomotion using anthropological knowledge*. In Proceedings of CASA, pages 103–110, Geneva, Switzerland, July 2004.
 - [Nicolas 06] G. Nicolas, F. Multon, G. Berillon & F. Marchal. *From bone to plausible bipedal locomotion using inverse kinematics*. Journal of Biomechanics, vol. In Press, 2006.
 - [Nilsson 85] J. Nilsson, A. Thorstensson & J. Halbertsam. *Changes in leg movements and muscle activity with speed of locomotion and mode of progression in humans*. Acta Physiol Scand, pages 457–475, 1985.
 - [Norman 76] R. Norman, M. Sharratt, J. Pezzack & E. Noble. *Biomechanics v-b, international series on, chapitre Reexamination of the mechanical efficiency of horizontal treadmill running*, pages 87–93. Baltimore : University Press, 1976.
 - [Noser 96] H. Noser & D. Thalmann. *The Animation of Autonomous Actors Based on Production Rules*. In Proc. of Computer Animation'96, pages 47–57. IEEE Computer Society Press, June 1996.
 - [Novacheck 98] T.F. Novacheck. *The biomechanics of running*. Gait and posture, vol. 7, pages 77–95, 1998.
 - [O'Brien 00] J. O'Brien, R.E. Bodenheimer, G. Brostow & J.K. Hodgins. *Automatic Joint Parameter Estimation from Magnetic Motion Capture Data*. Proc. of Graphics Interface'2000, pages 53–60, 2000.
 - [Olney 96] S.J. Olney & C. Richards. *Hemiparetic gait following stroke. Part 1 : characteristics*. Gait and Posture, vol. 4, pages 136–148, 1996.

-
- [Orendurff 06] M.S. Orendurff, A.D. Segal, J.S. Berge, K.C. Flick, D. Spanier & G.K. Klute. *The kinematics and kinetics of turning : limb asymmetries associated with walking a circular path*. Gait and Posture, vol. 23, no. 1, pages 106–111, 2006.
- [Paris 06] S. Paris, S. Donikian & N. Bonvalet. *Environmental abstraction and path planning techniques for realistic crowd simulation*. Computer Animation and Virtual Worlds, vol. 17, no. 3-4, pages 325–335, 2006.
- [Pearsall 99] DJ. Pearsall & PA. Costigan. *The effect of segment parameter error on gait analysis results*. Gait and Posture, vol. 9, no. 3, pages 173–183, *1999.
- [Pelachaud 02] C. Pelachaud & I. Poggi. *Subtleties of Facial Expressions in Embodied Agents*. Journal of Visualization and Computer Animation, vol. 13, pages 301–312, 2002.
- [Pettre 03] J. Pettre, J.P. Laumond & T. Simeon. *A 2-stages locomotion planner for digital actors*. In Proceedings of ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation, pages 258–264, San Diego, California, 2003.
- [Pierrynowski 80] M.R. Pierrynowski, D.A. Winter D.A. & R.W. Norman. *Transfers of mechanical energy within the total body and mechanical efficiency during treadmill walking*. Ergonomics, vol. 23, no. 2, pages 147–156, 1980.
- [Pollard 00] N. Pollard & F. Behmaram-Mosavat. *Force-based motion editing for locomotion tasks*. In Proceedings of IEEE international conference on Robotics and Automation, San Francisco, CA, April 2000.
- [Post 00] AA. Post, A. Daffertshofer & P.J. Beek. *Principal components in three-ball cascade juggling*. Biol Cybernetics, vol. 82, no. 2, pages 143–152, 2000.
- [Pozzo 90] T. Pozzo, A. Berthoz & L. Lefort. *Head stabilization during various locomotor tasks in humans. I. Normal subjects*. Exp Brain Res., vol. 82, no. 1, pages 97–106, 1990.
- [Pronost 06] N. Pronost, G. Dumont, G. Berillon & G. Nicolas. *Morphological and stance interpolations in database for simulating bipedalism of virtual humans*. Visual Computer, vol. 22, pages 4–13, 2006.
- [Psotka 95] J. Psotka. *Immersive tutoring systems : Virtual reality and education and training*. Instructional Science, vol. 23, pages 405–431, 1995.
- [Rao 05] G. Rao, D. Amaratini, E. Berton & D. Favier. *Influence of body segments parameters estimation models on inverse dynamics solutions during gait*. Journal of Biomechanics, 2005.
- [Reitsma 03] P.S. Reitsma & N. Pollard. *Perceptual metrics for character animation : sensitivity to errors in ballistic motion*. In Proceedings of ACM SIGGRAPH, 2003.

-
- [Rezzoug 06] N. Rezzoug, P. Gorce, A. Heloir, S. Gibet, JF. Kamp, F. Multon & C. Pelachaud. *Virtual humanoids endowed with expressive communication gestures : the HuGEx project*. In Proceedings of IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, Taipei, Taiwan, 2006.
 - [Safonova 04] A. Safonova, JK. Hodgins & N. Pollard. *Synthesizing physically realistic human motion in low-dimensional, behavior-specific spaces*. In Proceedings of ACM SIGGRAPH, 2004.
 - [Safonova 05] A. Safonova & J.K. Hodgins. *Analyzing the physical correctness of interpolated human motion*. In SCA '05 : Proceedings of the 2005 ACM SIGGRAPH/Eurographics symposium on Computer animation, pages 171–180. ACM Press, 2005.
 - [Sakurai 85] S. Sakurai & M. Miyashita. *Mechanical energy changes during treadmill running*. Medicine and Science in Sports and Exercise, vol. 17, no. 1, pages 148–152, 1985.
 - [Salvador 04] S. Salvador & P. Chan. *FastDTW : toward accurate dynamic time warping in linear time and space*. In Proceedings of Workshop on Mining Temporal and Sequential Data, pages 70–80, 2004.
 - [Saunders 53] J.B. Saunders. *The majors determinants in normal and pathologic gait*. J. Bone Joint Surg., vol. 35, no. A, pages 543–548, 1953.
 - [Schaal 96] S. Schaal, CG. Atkeson & D. Sternad. *One-Handed Juggling : A Dynamical Approach to a Rhythmic Movement Task*. J Mot Behav., vol. 28, no. 2, pages 165–183, 1996.
 - [Schaal 01] S. Schaal & D. Sternad. *Origins and violations of the 2/3 power law in rhythmic three-dimensional arm movements*. Exp Brain Res., vol. 136, no. 1, pages 60–72, 2001.
 - [Sellers 05] W.I. Sellers, M.C. Gemma, W. Wang & R.H. Crompton. *Stride lengths, speed and energy costs in walking of Australopithecus afarensis : using evolutionary robotics to predict locomotion of early human ancestors*. Journal of the Royal Society Interface, vol. 2, pages 431–441, 2005.
 - [Shapiro 06] A. Shapiro & P. Faloutsos. *Style components*. In Proceedings of Graphics interface 2006, In Press 2006.
 - [Shin 01] H.J. Shin, J. Lee, S.Y. Shin & M. Gleicher. *Computer puppetry : An importance-based approach*. ACM Trans. Graph., vol. 20, no. 2, pages 67–94, 2001.
 - [Skocaj 02] D. Skocaj & A. Leonardis. *Weighted incremental subspace learning*. In Proceedings of Workshop on Cognitive Vision, pages 19–20, Zurich, Switzerland, 2002.
 - [Slater 93] M. Slater & M. Usoh. *Presence in immersive virtual environments*. In Proceedings of IEEE Virtual Reality International Symposium, 1993.
 - [Slater 94] M. Slater, M. Usoh & A.M. Steed. *Depth of presence in virtual environments*. Presence : teleoperators and virtual environments, vol. 3, no. 2, pages 130–144, 1994.

-
- [Slater 95] M. Slater, V. Linakis, M. Usoh & R. Kooper. *Immersion, presence, and performance in virtual environments : An experiment using tri-dimensional chess*. In Proceedings of ACM Virtual Reality Software and Technology (VRST), pages 163–172, 1995.
- [Slater 99] M. Slater. *Measuring presence : a response to the Witmer and Singer questionnaire*. Presence : Teleoperators and Virtual Environments, vol. 8, no. 5, pages 560–566, 1999.
- [Steuer 92] J. Steuer. *Defining virtual reality : Dimensions determining telepresence*. Journal of Communication, vol. 42, no. 4, pages 73–93, 1992.
- [Sun 01] H.C. Sun & D.N. Metaxas. *Automating gait generation*. Proceedings of Siggraph'01, pages 261–269, 2001.
- [Tardieu 93] C. Tardieu, A. Aurengo & B. Tardieu. *New method of threedimensional analysis of bipedal locomotion for the study of displacements of the body and body-parts centers of mass in man and non-human primates : evolutionary framework*. Am J Phys Anthropol, vol. 90, pages 455–476, 1993.
- [T.K.Capin 97] T.K.Capin, I.S.Pandzic, H.Noser, N.Magnenat-Thalmann & D.Thalmann. *Virtual Human Representation and Communication in VLNET*. IEEE Computer Graphics and Applications, vol. 17, no. 2, pages 42–53, 1997.
- [Tolani 00] D. Tolani, A. Goswami & N. Badler. *Real-Time Inverse Kinematics Techniques for Anthropomorphic Limbs*. Graphical Models, vol. 62, pages 353–388, 2000.
- [Torczon 89] V. Torczon. *Multi-directional Search : A Direct Search Algorithm for Parallel Machines*. PhD thesis, Rice University, Houston, Texas, USA, 1989.
- [Turvey 90] M.T. Turvey. *Coordination*. Am. Psychol., vol. 45, pages 938–953, 1990.
- [Unnithan 99] VB. Unnithan, JJ. Dowling, G. Frost & O. Bar-Or. *Role of mechanical power estimates in the O2 cost of walking in children with cerebral palsy*. Medicine and Science in Sports and Exercise, vol. 31, no. 12, pages 1703–1708, 1999.
- [Usoh 00] M. Usoh, E. Catena, S. Arman & M. Slater. *Presence Questionnaires in Reality*. Presence : Teleoperators and Virtual Environments, vol. 9, no. 5, pages 497–503, 2000.
- [Vaughan 82] C. Vaughan, J. Andrews & J. Hay. *Selection of body segment parameters by optimization methods*. Journal of biomechanical engineering, vol. 104, pages 38–44, 1982.
- [Vaughan 84] K.R. Vaughan. *Biomechanics of running gait*. Crit. Rev. Eng., vol. 12, no. 1, pages 1–48, 1984.
- [Vereijken 92] B. Vereijken, H.T. Whiting & W.J. Beek. *A dynamical systems approach to skill acquisition*. J Exp Psychol, vol. 45, no. 2, pages 323–344, 1992.

-
- [Vianin 99] P. Vianin. *L'Estimation de Distances dans un Espace Virtuel Dynamique*. PhD thesis, Université de Genève, 1999.
 - [Vieilledent 01] S. Vieilledent, Y. Kerlirzin, S. Dalbera & A. Berthoz. *Relationship between velocity and curvature of a human locomotor trajectory*. Neuroscience letters, vol. 305, no. 1, pages 65–69, 2001.
 - [Viviani 82] P. Viviani & C. Terzuollo. *Trajectory determines movement dynamics*. Neuroscience, vol. 7, pages 431–437, 1982.
 - [Wallbott 98] H.G. Wallbott. *Bodily expression of emotion*. European Journal of Social Psychology, vol. 28, pages 879–896, 1998.
 - [Wang 03a] J. Wang & B. Bodenheimer. *An Evaluation of a Cost Metric for Selecting Transitions between Motion Segments*. Eurographics/SIGGRAPH Symposium on Computer Animation 2003, pages 232–238, 2003.
 - [Wang 03b] WJ Wang & RH. Crompton. *Size and power required for motion with implication for the evolution of early hominids*. Journal of Biomechanics, vol. 36, pages 1237–1246, 2003.
 - [Watt 92] A. Watt & M. Watt. *Advanced animation and rendering techniques, theory and practice*. ACM Press, 1992.
 - [Wicke 03] J. Wicke & B. Lopers. *Validation of the volume function within Jensen's (1978) elliptical cylinder model*. Journal of Applied Biomechanics, vol. 19, no. 1, pages 3–12, 2003.
 - [Willems 95] PA. Willems, GA. Cavagna & NC. Heglund. *External, internal and total work in human locomotion*. J Exp Biol, vol. 198, no. 2, pages 379–393, 1995.
 - [Williams 83] K.R. Williams & P.R. Cavanagh. *A model for the calculation of mechanical power during distance running*. Journal of Biomechanics, vol. 16, no. 2, pages 115–128, 1983.
 - [Winter 79] DA. Winter. *A new definition of mechanical work done in human movement*. Journal of Applied Physiology : Respirat. Environ.Exercise Physiol, vol. 46, no. 1, pages 79–83, 1979.
 - [Winter 90] D.A. Winter. *Biomechanics and motor control of human movement*. John Wiley and Sons, 1990.
 - [Wit 98] A. Wit & J. Elias. *A three-dimensional kinematic analysis of handball throws*. In Proceedings of XVI International symposium on biomechanics in sports, numéro 1, pages 281–284, 1998.
 - [Witkin 88] A. Witkin & M. Kass. *Spacetime Constraints*. In Proceedings of ACM SIGGRAPH, pages 159–168, Atlanta, Georgia, August 1988. Addison Wesley.
 - [Witkin 95] A. Witkin & Z. Popović. *Motion warping*. In Proceedings of the 22nd annual conference on Computer graphics and interactive techniques, pages 105–108. ACM Press, 1995.

-
- [Witmer 98] B.G. Witmer & M.J. Singer. *Measuring presence in virtual environments : A presence questionnaire*. Presence : Teleoperators and Virtual Environments, vol. 7, no. 3, pages 225–240, 1998.
- [Wu 02] G. Wu, S. Siegler, P. Allard, C. Kirtley, A. Leardini, D. Rosenbaum, M. Whittle, D.D. D Lima, L. Cristofolini & H. Witte et al. *ISB recommendation on definition of joint coordinate systems for the reporting of human joint motion part I : ankle, hip and spine*. Journal of Biomechanics, vol. 35, no. 4, pages 543–548, 2002.
- [Wu 05] G. Wu, F.C.T. van der Helm, H.E.J. Veeger, M. Makhsous, P. Van Roy, C. Anglin, J. Nagels, A.R. Karduna & K. McQuade and X. Wang et al. *ISB recommendation on definitions of joint coordinate systems of various joints for the reporting of human joint motion Part II : shoulder, elbow, wrist and hand*. Journal of Biomechanics, vol. 38, no. 5, pages 981–992, 2005.
- [Yamane 03] K. Yamane & Y. Nakamura. *Dynamic filters - concept and implementations of online motion generator for human figures*. IEEE transactions on robotics and automation, vol. 19, no. 3, pages 421–432, 2003.
- [Yang 04] P. Yang, J. Laszlo & K. Singh. *Layered dynamic control for interactive character swimming*. In SCA '04 : Proceedings of the 2004 ACM SIGGRAPH/Eurographics symposium on Computer animation, pages 39–47, New York, NY, USA, 2004. ACM Press.
- [Yeadon 89] M.R. Yeadon & M. Morlock. *The appropriate use of regression equations for the estimation of segmental inertia parameters*. Journal of Biomechanics, vol. 22, pages 683–689, 1989.
- [Yeadon 90] M.R. Yeadon. *The simulation of aerial movement - I. The determination of orientation angles from film data*. Journal of Biomechanics, vol. 23, pages 59–66, 1990.
- [Zajac 90] F.E. Zajac & J.M. Winters. *Modeling musculoskeletal movement systems : Joint and body segmental dynamics, musculoskeletal actuation, and neuromuscular control ; in multiple muscle systems*, j.m winters and s.l-y woo editors. Springer Verlag, New York, 1990.
- [Zatsiorsky 90] V. Zatsiorsky, V. Seluyanov & L.G. Chugunova. *Contemporary problems of biomechanics, chapitre Methods of determining mass-inertial characteristics of human body segments*, pages 273–291. Moscow : Mir publishers, 1990.
- [Zeltzer 82] D. Zeltzer. *Motor Control Techniques for Figure Animation*. IEEE Computer Graphics and Applications, vol. 2, no. 9, pages 53–59, November 1982.
- [Zordan 99] V.B. Zordan & J.K. Hodgins. *Tracking and Modifying Upper-body Human Motion Data with Dynamic Simulation*. In Proc. of EGCAS'99, pages 13–22, September 1999.
- [Zordan 05] V. Zordan, A. Majkowska, B. Chiu & M. Fast. *Dynamic response for motion capture animation*. ACM Trans. Graph., vol. 24, no. 3, pages 697–701, 2005.