

**Direction des bibliothèques**

**AVIS**

Ce document a été numérisé par la Division de la gestion des documents et des archives de l'Université de Montréal.

L'auteur a autorisé l'Université de Montréal à reproduire et diffuser, en totalité ou en partie, par quelque moyen que ce soit et sur quelque support que ce soit, et exclusivement à des fins non lucratives d'enseignement et de recherche, des copies de ce mémoire ou de cette thèse.

L'auteur et les coauteurs le cas échéant conservent la propriété du droit d'auteur et des droits moraux qui protègent ce document. Ni la thèse ou le mémoire, ni des extraits substantiels de ce document, ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans l'autorisation de l'auteur.

Afin de se conformer à la Loi canadienne sur la protection des renseignements personnels, quelques formulaires secondaires, coordonnées ou signatures intégrées au texte ont pu être enlevés de ce document. Bien que cela ait pu affecter la pagination, il n'y a aucun contenu manquant.

**NOTICE**

This document was digitized by the Records Management & Archives Division of Université de Montréal.

The author of this thesis or dissertation has granted a nonexclusive license allowing Université de Montréal to reproduce and publish the document, in part or in whole, and in any format, solely for noncommercial educational and research purposes.

The author and co-authors if applicable retain copyright ownership and moral rights in this document. Neither the whole thesis or dissertation, nor substantial extracts from it, may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

In compliance with the Canadian Privacy Act some supporting forms, contact information or signatures may have been removed from the document. While this may affect the document page count, it does not represent any loss of content from the document.

Université de Montréal

Illustration non-photoréaliste de séquences de  
captures de mouvements

par

Simon Bouvier-Zappa

Département d'informatique et de recherche opérationnelle  
Faculté des arts et des sciences

Mémoire présenté à la faculté des études supérieures  
en vue de l'obtention du grade de  
Maître ès sciences (M.Sc.)  
en informatique

août 2007

© Simon Bouvier-Zappa, 2007



Université de Montréal  
Faculté des études supérieures

Ce mémoire de maîtrise intitulé

Illustration non-photoréaliste de séquences de  
captures de mouvements

présenté par  
Simon Bouvier-Zappa

a été évalué par un jury composé des personnes suivantes :

Houari Sahraoui  
président-rapporteur

Victor Ostromoukhov  
directeur de recherche

Pierre Poulin  
codirecteur de recherche

Douglas Eck  
membre du jury

Mémoire accepté le 22 octobre 2007

# Sommaire

Lorsque l'information spatiale est projetée dans une image, elle perd beaucoup de son information initiale. Pour pallier à cette perte, les artistes utilisent des indicateurs visuels, des outils non-photoréalistes qui ajoutent ou amplifient l'information de l'image. Pour améliorer l'information temporelle, ceux-ci utilisent les indicateurs de mouvements, une catégorie d'indicateurs visuels qui illustrent spécifiquement les mouvements dans l'image.

Ce mémoire présente un système interactif qui synthétise l'information temporelle d'un personnage animé provenant de séquences de captures de mouvements par le biais d'indicateurs de mouvements. Nous proposons l'utilisation combinée de la flèche de mouvement, l'onde de bruit et le suivi stroboscopique pour illustrer les gestes du personnage dans une image statique.

Nous laissons l'utilisateur choisir manuellement une pose de la séquence de capture de mouvements, déterminer le point de vue optimal et ajouter les indicateurs de mouvements souhaités. Le système ajuste automatiquement l'apparence des indicateurs de mouvements par rapport au point de vue et permet à l'utilisateur de régler les valeurs des paramètres d'illustration pour obtenir de meilleurs résultats en temps réel.

## **Mots clefs :**

Non-photoréalisme, animation, capture de mouvements, figure articulée, bande dessinée, dessin technique, indicateurs visuels, indicateurs de mouvement.

# Abstract

As spatial data is transferred to an image, it loses much of its initial information. Artists use visual cues, *i.e.* non-photorealistic indicators, to add supplemental information to the image. To enhance temporal information, they use motion cues, a category of visual cues that specifically illustrate the movements in the image. For some time, techniques such as cartoon illustration and storyboard design use motion cues to convey temporal information to the viewer.

This master thesis presents an interactive system that synthesizes temporal information of an animated character using artist-inspired motion cues derived from skeletal motion capture data. We propose the combined use of motion arrows, noise waves, and stroboscopic motion to emphasize movements in a still image.

We let the user manually select a pose of motion capture data, determine the view point, and add desired motion cues to the image. The system automatically adjusts the motion cue appearance to the view point and allows the user to fine-tune illustration parameters for greater expressiveness in real time.

## Keywords :

Non-photorealism, animation, motion capture, articulated figure, cartoon, technical drawing, visual cues, motion cues.

# Table des matières

<b>Remerciements</b>	<b>xii</b>
<b>1 Introduction</b>	<b>1</b>
<b>2 L'image</b>	<b>4</b>
2.1 La bande dessinée . . . . .	5
2.2 Le dessin technique . . . . .	7
2.3 Le scénarimage . . . . .	8
2.4 La chorégraphie . . . . .	10
2.5 Récapitulation . . . . .	12
<b>3 Travaux antérieurs</b>	<b>13</b>
3.1 Techniques inspirées de la bande dessinée . . . . .	13
3.2 Techniques inspirées du scénarimage . . . . .	18
3.3 Techniques inspirées du dessin technique . . . . .	18
<b>4 Hiérarchie</b>	<b>21</b>
4.1 Capture de mouvements . . . . .	21
4.2 Extraction de données temporelles . . . . .	23
4.2.1 Procédure d'extraction pour un cas simplifié . . . . .	23
4.2.2 Procédure d'extraction pour un cas généralisé . . . . .	24
4.3 Groupements hiérarchiques . . . . .	26
4.4 Groupements hiérarchiques pour un squelette humain . . . . .	27
<b>5 Indicateurs de mouvements</b>	<b>30</b>
5.1 Flèche de mouvement . . . . .	32
5.1.1 Analyse de la flèche de mouvement . . . . .	32

5.1.2	Construction de la flèche de mouvement . . . . .	33
5.2	Onde de bruit . . . . .	37
5.2.1	Analyse de l'onde de bruit . . . . .	37
5.2.2	Construction de l'onde de bruit . . . . .	39
5.3	Suivi stroboscopique . . . . .	42
5.4	Extensions . . . . .	44
5.4.1	Illustration par poses multiples . . . . .	44
5.4.2	Illustration par traces de pas . . . . .	45
<b>6</b>	<b>Résultats</b>	<b>48</b>
6.1	Poses individuelles . . . . .	48
6.2	Poses multiples . . . . .	54
<b>7</b>	<b>Conclusion</b>	<b>58</b>
7.1	Sommaire . . . . .	58
7.2	Perspectives futures . . . . .	60
<b>A</b>	<b>Terminologie</b>	<b>62</b>
	<b>Bibliographie</b>	<b>63</b>

# Table des figures

2.1	Conversion des données temporelles sur support statique . . . . .	5
2.2	Différents indicateurs temporels fréquemment utilisés en bande dessinée	6
2.3	Pictogrammes visuels fréquemment utilisés en bande dessinée . . . . .	7
2.4	Lignes utilisées pour le dessin technique . . . . .	8
2.5	Hachures symboliques utilisées pour identifier un matériau . . . . .	9
2.6	Pictogrammes utilisés dans la notation Laban . . . . .	11
2.7	Utilisation de la portée de mouvement . . . . .	11
3.1	Ajout de lignes de mouvement inspirées de la bande dessinée sur des animations . . . . .	14
3.2	Ajout d'indicateurs de mouvement sur des séquences vidéo . . . . .	15
3.3	Ajout d'indicateurs de mouvement sur des données de graphe de scène	16
3.4	Segmentation des poses clés d'une séquence de capture de mouvements	17
3.5	Génération de scénarimages par utilisation de séquences vidéo . . . . .	19
3.6	Instructions d'assemblage technique . . . . .	20
4.1	Extraction de la courbe de mouvement pour un joint unique . . . . .	24
4.2	Exemple d'illustration utilisant l'information individuelle de chaque joint du squelette . . . . .	25
4.3	Extraction de la courbe de mouvement pour un groupement de joints .	25
4.4	Subdivision possible du groupement de joints . . . . .	27
4.5	Groupements hiérarchiques appliqués au squelette humain . . . . .	28
5.1	Procédure de construction d'un segment de flèche . . . . .	35
5.2	Paramètres de construction des flèches de mouvement . . . . .	36
5.3	Analyse de la courbe de mouvement pour l'illustration des ondes de bruit	38



5.4	Affichage du contour sur une géométrie. . . . .	40
5.5	Construction de l'onde de bruit . . . . .	41
5.6	Paramètres de construction du suivi stroboscopique . . . . .	43
5.7	Isolation de la courbe de mouvement entre deux poses clés . . . . .	45
5.8	Exemple de superposition lors de l'illustration des traces de pas . . . . .	47
6.1	Une séquence d'exercices . . . . .	49
6.2	Une séquence d'haltérophilie . . . . .	50
6.3	Une séquence de soccer . . . . .	51
6.4	Une séquence de coup de pied rotatif . . . . .	52
6.5	Une séquence de roue . . . . .	53
6.6	Une séquence de lancer de ballon . . . . .	54
6.7	Un personnage se tient en équilibre sur un pied . . . . .	54
6.8	Une séquence de marche illustrée par huit poses clés . . . . .	56
6.9	Une séquence de danse de lambada illustrée par traces de pas . . . . .	56

# Liste des tableaux

5.1	Caractéristiques accentuées par les indicateurs de mouvements . . . . .	31
6.1	Paramètres utilisés pour les images . . . . .	55

# Liste des algorithmes

1	<i>créerFlèche</i> ( $t$ ) . . . . .	33
2	<i>construireFlèche</i> ( $C(t)$ ) . . . . .	35
3	<i>créerOndeDeBruit</i> ( $t$ ) . . . . .	38
4	<i>construireOndeDeBruit</i> ( $\vec{v}, type$ ) . . . . .	39

# Remerciements

Ces deux dernières années ont vite passé! J'ai rencontré et côtoyé durant ce temps une grande quantité de personnes, des chercheurs et étudiants passionnés et passionnants, qui ont su me motiver dans mon travail. Ainsi, j'aimerais particulièrement remercier certaines personnes. Tout d'abord, j'aimerais remercier mon directeur, Victor Ostromoukhov et mon co-directeur Pierre Poulin qui ont su me diriger à travers ce projet entreprenant qui voit son aboutissement avec ce mémoire. J'aimerais remercier Yann Rousseau, mon compagnon de *cellule*, qui est toujours prêt à philosopher sur les pourquoi et les comment de la vie! Ses commentaires et conseils m'ont été inestimables. Ensuite, j'aimerais remercier Philippe Beaudoin et Luc Leblanc qui m'ont beaucoup aidé à démarrer ce projet. J'aimerais aussi remercier mon père, Jacques Zappa, et ma mère, Louise Bouvier qui m'ont tous deux appuyé tout au long de ma maîtrise, ainsi que le reste de ma famille qui n'est jamais bien loin! De plus, merci à Jonathan Viens, mon bon ami, dont le support moral durant la première année de ma maîtrise m'a beaucoup aidé à persévérer. Merci à Roger Gagné pour ses conseils sur les notations en chorégraphie. Finalement, je tiens à remercier le CRSNG de même que Ubisoft pour leur soutien financier.

# Chapitre 1

## Introduction

*To document and explain a process, to make verbs visible, is at the heart of information design.*

Edward Tufte, *Visual Explanations*

La parole est un puissant outil qui a permis à l'être humain de transmettre ses idées et de les concrétiser. C'est un des moteurs les plus importants qui ont aidé notre espèce à évoluer en tant que société. Or, la parole s'oublie facilement. Et c'est pourquoi le langage visuel, l'art de représenter une idée par une image, permet à l'être humain de communiquer efficacement son savoir à travers les âges. Toutefois, encore faut-il que celui-ci communique adéquatement cette idée, car l'image en elle-même est spatialement et temporellement limitée. Pour combler cette limite du médium visuel, l'artiste ajoute habituellement à l'image une série d'indicateurs visuels, indices perceptuellement identifiables qui traversent les cultures. Pour améliorer spécifiquement l'information temporelle d'une image, l'artiste utilise l'indicateur de mouvement, une catégorie d'indicateurs visuels fréquemment utilisés dans les arts contemporains comme la bande dessinée et l'animation.

Par sa représentation statique du mouvement, l'être humain révèle qu'il est fasciné par celui-ci et que son oeil a une habileté particulière à le déceler, même aux endroits où il n'existe pas a priori [Pal99]. Plusieurs indices comme le flou de mouvement, le suivi stroboscopique ou les lignes de strie, fréquemment utilisés en illustration, découlent directement de cette perception instantanée du mouvement. Les artistes ont raffiné ces indicateurs visuels et leur ont associé des caractéristiques temporelles plus précises.

Les flèches de mouvement, surtout utilisées en scénarimage, et les lignes d'action, qui originent de la bande dessinée, fournissent au lecteur les outils nécessaires à la reconstitution de l'action, mais ne véhiculent pas les mêmes propriétés perceptuelles innées de mouvement.

Dans ce mémoire, nous proposons des méthodes permettant de combler en partie l'information temporelle laissée vacante par la projection statique, sur un médium 2D, de l'information temporelle 4D. Nous utilisons, pour ce faire, des séquences de captures de mouvements squelettiques. En informatique graphique, la capture de mouvements est un procédé populaire qui permet de transposer l'information spatiale et temporelle d'acteurs munis de capteurs en données informatiques. La capture de mouvements aide ainsi à améliorer le réalisme des gestes de personnages articulés, et est désormais presque toujours intégrée aux animations et jeux vidéo récents. En isolant une pose statique de la séquence, nous proposons des méthodes qui utilisent extensivement la hiérarchie propre aux figures articulées, ainsi que les données temporelles de la capture de mouvements, pour illustrer, à l'aide d'indicateurs de mouvements, les gestes du personnage à cet instant choisi.

Nous proposons l'utilisation de groupements hiérarchiques qui isolent les régions perceptuellement intéressantes de la figure articulée sur différents niveaux de détails. Bien que nous appliquions ces groupements à des séquences de captures de mouvements d'êtres humains, la méthode proposée s'adapte à toutes les figures articulées hiérarchiques. Pour améliorer l'information temporelle de la pose statique, nous suggérons l'application d'indicateurs de mouvements qui combler les limitations intrinsèques du médium 2D pour informer l'utilisateur de la position, direction, vitesse et accélération du mouvement. Ainsi, nous recommandons l'utilisation combinée de trois indicateurs de mouvement : les flèches de mouvement, les ondes de bruit et le suivi stroboscopique. Là où un seul indicateur laisserait de l'information vacante, l'utilisation des trois indicateurs parvient à combler les limites de chacun. Notre approche est semi-automatique et laisse à l'utilisateur un contrôle sur l'apparence finale des indicateurs qu'il a choisi d'ajouter à son illustration. À l'illustration de pose unique, nous ajoutons quelques extensions pour améliorer l'information temporelle de plusieurs poses dans une seule image. Aussi, nous démontrons comment représenter le mouvement de multiples poses clés stroboscopiques. Enfin, nous proposons aussi de simplifier le mouvement par l'illustration des traces de

pas du personnage. L'analyse du mouvement et son illustration se font en temps réel. Bien que ce ne soit pas le but recherché, ceci améliore l'interactivité du système.

Ce mémoire se divise en sept chapitres. Le chapitre 2 fait état des limites de l'image et présente un survol des techniques d'illustration populaires qui utilisent le langage visuel pour transmettre de l'information. Ensuite, au chapitre 3, nous présentons les derniers travaux de recherche sur la synthèse des indicateurs visuels et de mouvement en informatique graphique. Dans le chapitre 4, nous expliquons comment construire les groupements hiérarchiques et comment en isoler l'information temporelle. Grâce à cette information, nous illustrons au chapitre 5 comment il est possible de construire les indicateurs de mouvement. Les résultats obtenus par le biais de ces méthodes sont présentés au chapitre 6. Nous concluons ce mémoire au chapitre 7 et en présentons des perspectives futures.

## Chapitre 2

# L'image

La perception du monde par l'être humain et la représentation qu'il est possible d'en faire sur papier sont très différentes. Alors que l'être humain analyse cette information par interpolation temporelle des données spatiales qu'il est en mesure de percevoir, le papier, lui, ne peut représenter que la projection statique sur plan 2D de cette information. En perception, on distingue ces deux concepts par l'"*instant*" et par le "*moment*" [Cut02]. L'instant est une représentation temporellement statique du monde, l'équivalent d'une photo dont on devrait se remémorer. Or, l'être humain ne peut interpréter les événements comme des instants ; l'instant ne contient pas suffisamment d'information pour analyser une action. Aussi, on introduit le concept de moment, qui représente l'événement sur un faible intervalle temporel.

En imagerie, il incombe à l'artiste d'ajouter l'information nécessaire à l'image 2D de façon à ce qu'elle possède le même niveau d'information que son homologue 4D (voir figure 2.1). On nomme l'outil ajouté à l'image, indicateur visuel. Cet indicateur est un symbole habituellement non-photoréaliste qui a pour but de combler l'information manquante à l'image, sans l'encombrer inutilement.

L'indicateur visuel fait partie intégrale des techniques d'illustration modernes. On le retrouve abondamment dans la bande dessinée contemporaine (section 2.1), un style d'illustration qui depuis son apparition vers la fin du 19<sup>ième</sup> siècle, n'a cessé de se redéfinir sans jamais atteindre de critères fixes. Au contraire, l'utilisation d'indicateurs visuels en dessin technique (section 2.2), en illustration de scénarimages (section 2.3), ou pour les chorégraphies (section 2.4) impose une série de critères stricts qui permettent aux images de véhiculer une information précise qui doit être reproduite par une tierce



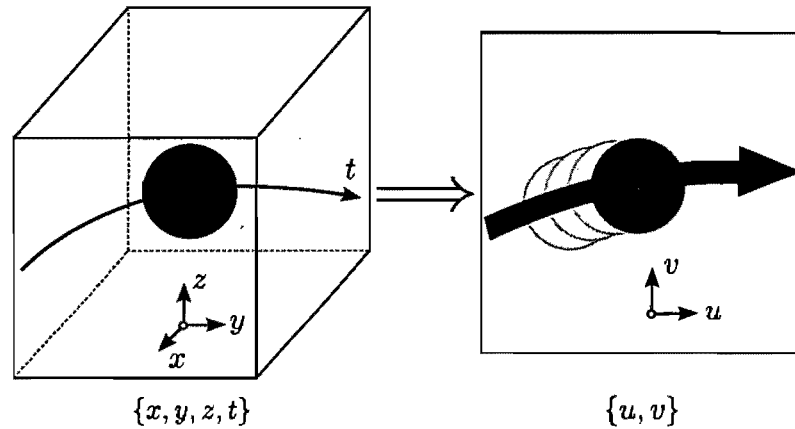


FIG. 2.1 – Conversion des données temporelles sur support statique. Pour améliorer l'information de l'image, l'artiste utilise un type d'indicateurs visuels qu'on appelle l'indicateur de mouvements.

personne.

Pour spécifiquement améliorer l'information reliée au mouvement dans une image, on utilise une sous-classe d'indicateurs visuels qu'on appelle les indicateurs de mouvements. Son utilisation est particulièrement primée dans l'illustration de bande dessinée, mais aussi dans l'illustration de manoeuvres techniques diverses, comme le langage pour sourds-muets, ou les symboles utilisés pour l'arbitrage de sports. Dans le chapitre 5 nous traitons de possibles utilisations des indicateurs de mouvements en imagerie computationnelle, et comment les appliquer à des captures de mouvements.

## 2.1 La bande dessinée

La bande dessinée est un style d'illustration qui a longtemps été associée à la culture littéraire pour enfants. En discrétisant une action dans différentes cellules, le bédéiste parvient à raconter une histoire. Mais pour le faire de façon convaincante, il doit utiliser un ensemble d'astuces qui ajoute à l'image l'information temporelle qu'elle perd [Eis85, McC93, McC06]. Les bédéistes sont parvenus à définir un nombre impressionnant de pictogrammes et d'indices visuels qui sont d'usage commun désormais. Or l'illustration de bande dessinée est bornée par très peu de règles. Ainsi, chaque bédéiste possède un style d'illustration qui lui est propre. De même, chaque culture définit un standard d'illustration qui amène des méthodes de narration différentes, mais qui se valent

les unes les autres. On dénombre trois courants prédominants dans la bande dessinée contemporaine : la bande dessinée américaine, européenne et japonaise.

Pour améliorer l'information temporelle de l'image, les bédéistes ont à leur disposition un grand nombre d'indicateurs de mouvements connus (voir figure 2.2) [McC93]. Parmi ceux-ci, le plus populaire reste toujours la ligne de vitesse (figure 2.2(a)) pour sa forme simple peu restrictive et la notion spatiale et temporelle du mouvement passé qu'elle donne au lecteur. La ligne de vitesse est couramment utilisée dans la bande dessinée américaine de façon exhaustive pour amplifier la force des mouvements, et de façon beaucoup plus contrôlée dans la bande dessinée européenne qui prône un style d'illustration beaucoup moins spectaculaire. Certains artistes font utilisation du suivi stroboscopique dans leurs illustrations pour donner au lecteur une impression de déjà vu (figure 2.2(b)). Sinon, pour améliorer le réalisme de l'action, le bédéiste peut imiter le flou laissé par un objet en mouvement sur une photo (figure 2.2(c)). Le flou photographique est un artefact visuel créé par le temps d'exposition non-nul nécessaire à la caméra pour acquérir l'image. Enfin, il est aussi possible de représenter le mouvement par apposition de champs de mouvement dans la scène plutôt que sur l'objet (figure 2.2(d)). Le mouvement subjectif ainsi créé donne l'impression au lecteur d'être lui-même en mouvement. Cette technique est particulièrement prisée dans la bande dessinée japonaise.

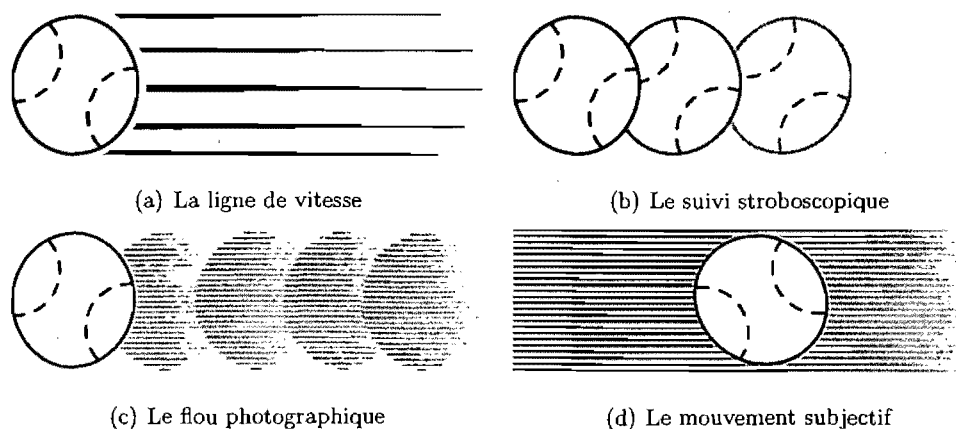


FIG. 2.2 – Différents indicateurs temporels fréquemment utilisés en bande dessinée.

Sans nécessairement amplifier le mouvement, certains indicateurs peuvent être utilisés pour suggérer un état quelconque [McC93]. Ainsi, de simples lignes ondulées permettent d'ajouter une odeur à un tas d'ordures (figure 2.3(a)), alors que ces mêmes lignes donnent une illusion de chaleur à une tasse de café (figure 2.3(b)). Disposés au-

tour d'un visage, de courts traits linéaires peuvent amplifier la surprise du personnage (figure 2.3(c)). À ce même visage, des gouttes d'eau permettent d'indiquer que le personnage a chaud (figure 2.3(d)). Les pictogrammes visuels utilisés dans la bande dessinée doivent rester simples pour ne pas surcharger l'illustration.

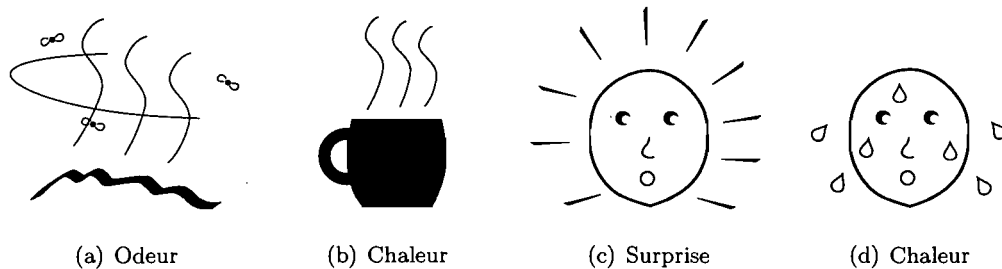


FIG. 2.3 – Pictogrammes visuels fréquemment utilisés en bande dessinée.

La bande dessinée se lit traditionnellement de haut en bas, de gauche à droite (pour les langues d'origine latine). Le bédéiste peut aussi utiliser les propriétés des cellules pour introduire de l'information supplémentaire à l'action qui y est illustrée [McC06]. Ainsi, une grande cellule amplifie habituellement l'importance de l'action et incite le lecteur à y accorder plus de temps. Le bédéiste peut étirer une cellule horizontalement ou verticalement pour introduire une notion de mouvement directionnel. Enfin, il peut modifier l'orientation de la cellule, ou même en effacer les bordures pour ajouter des effets supplémentaires.

## 2.2 Le dessin technique

Alors que le croquis possède, pour son concepteur, toute l'information dont il a besoin pour reproduire son idée, il restera probablement obscur pour la tierce personne qui désire le manufacturer. Aussi, depuis longtemps, les architectes, designers et ingénieurs de toutes sortes utilisent le dessin technique pour standardiser la fabrication d'objets. Le croquis a beaucoup évolué à travers le temps et donne à la disposition du dessinateur une librairie d'indicateurs visuels dont il doit faire un usage strict [GMS<sup>+</sup>80, Jen68]. Plus récemment, les programmes de CAD (*computer aided design*) viennent améliorer la génération puis l'exploitation du dessin technique.

Il est possible de représenter le dessin technique de deux façons : par vues multiples, ou par vue en perspective [GMS<sup>+</sup>80]. Dans le croquis à vues multiples, le dessinateur

répète au plus les trois vues essentielles pour reproduire l'objet : la vue de face, la vue de droite et la vue de dessus. Le dessin ne comporte que les vues qui sont nécessaires à la reconstruction de l'objet. Il existe trois représentations usuelles du dessin technique en perspective : la perspective axonométrique, oblique (par projection orthographique) et d'observation (avec un point de fuite).

Les normes de dessin technique imposent des traits de ligne distincts pour représenter les caractéristiques de l'objet décrit (voir figure 2.4). Les lignes visibles et cachées sont les plus fréquemment utilisées et faciles à identifier. Les lignes de hachure sont utilisées dans les patrons de texture (figure 2.5). Les axes de symétrie sont habituellement apposés aux portions circulaires de l'objet. Les lignes de cote spécifient les dimensions de l'objet. Les interruptions courtes et longues permettent de couper une partie de l'objet pour en afficher les parties cachées. Les lignes fantômes simplifient une portion de l'objet qu'on sait répétitive.

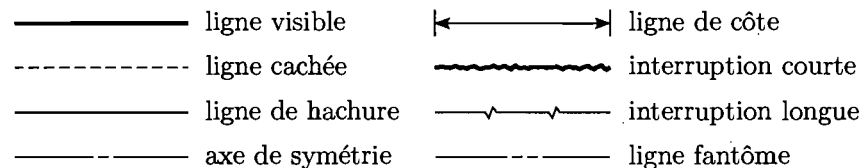


FIG. 2.4 – Lignes utilisées pour le dessin technique. Les lignes se distinguent par leur épaisseur de trait, et par les distances entre les traits.

Afin de différencier les différents matériaux dont sont constitués les objets représentés, le dessinateur a recours à une variété de patrons (voir figure 2.5). Chaque patron identifie une catégorie de matériau. C'est au dessinateur de spécifier quel est le matériau précis qui doit être utilisé dans la légende du dessin.

### 2.3 Le scénarimage

Le scénarimage (*storyboard*) permet de représenter par une séquence d'images la marche à suivre pour mettre à bien le tournage d'un film ou bien la production d'un dessin animé [Har99]. Le scénarimage met en images les différents personnages et objets en action dans une scène. Il comprend aussi une série d'indications plus techniques qui servent à l'équipe de tournage. Par conséquent, cette représentation est un mélange de bande dessinée et de dessin technique.

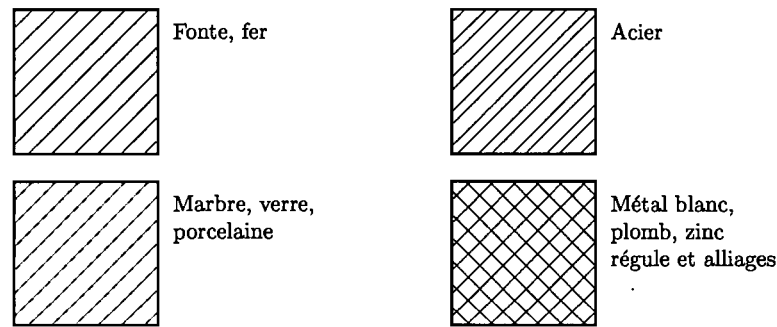


FIG. 2.5 – Hachures symboliques utilisées pour identifier un matériau. Les hachures sont habituellement ajoutées sur les faces coupées de l'objet.

Comme la bande dessinée, les événements de la scène sont séparés dans différentes cellules séquentielles desquelles il est possible de faire la reconstitution temporelle. Chaque image met en perspective l'action entre les divers personnages. Dans son illustration, l'artiste doit séparer les personnages qui sont dans l'arrière-plan, le plan milieu et l'avant-plan. De même, l'image doit indiquer à la caméra quel type de plan il est nécessaire de filmer : un gros plan, plan moyen ou plan séquence. Finalement, l'artiste doit laisser transparaître la couleur ambiante de la scène (ou le ton). Une couleur claire amplifie l'élément comique ou léger de l'action, tandis qu'une couleur foncée amplifie l'élément tragique de celle-ci.

À l'image, l'artiste ajoute des indicateurs visuels pour clarifier les actions réalisées et certains détails techniques. Les créateurs de scénarimages préconisent la flèche de mouvement, mais ne se limitent pas à celle-ci. La flèche permet entre autres d'illustrer avec précision la position ainsi que la direction du mouvement. De plus, sa surface large permet à l'artiste d'apposer des indications textuelles à même celle-ci.

Finalement, l'artiste ajoute les indications textuelles nécessaires à une compréhension rapide de la cellule. Les objets importants de la scène doivent être clairement identifiés. Des notes supplémentaires peuvent aussi être ajoutées sous la cellule pour résumer brièvement l'action réalisée. Enfin, l'artiste doit indiquer les informations essentielles à la disposition des caméras et des lumières nécessaires à la mise en scène.

## 2.4 La chorégraphie

Depuis longtemps, les chorégraphes se servent de notations pour reproduire le mouvement. On retrace les premières illustrations de chorégraphies vers le 17<sup>e</sup> siècle [Hut84]. De nos jours, plusieurs notations sont couramment utilisées en danse. Chaque notation comporte un ensemble de pictogrammes qui décrivent avec plus ou moins de précision le mouvement que doit exécuter le danseur. De ces notations, la notation Laban ou *labanotation* donne la représentation du mouvement la plus précise et la plus versatile. Les préceptes qui la régissent ont été définis par Rudolf Von Laban [Lab74]. De sa création dans les années 30, jusqu'à aujourd'hui, la notation Laban s'est raffinée en ajoutant des détails utiles aux danseurs. On peut maintenant la lire à même une portée pour obtenir une correspondance directe entre la musique et les mouvements qui s'y associent.

Les mouvements potentiels que l'être humain peut exécuter à un point précis sont représentés par sa *kinésphère*, une sphère de mouvement qui englobe la personne [Lab74]. En étendant au maximum ses bras et ses jambes, elle parviendra à atteindre la périphérie de la sphère. Laban simplifie l'information de la kinésphère en isolant les mouvements essentiels pour les chorégraphies [Lab74, Hut84]. En premier lieu, il coupe la sphère en trois différents niveaux qui réfèrent à la hauteur à laquelle doit être exécuté le mouvement. Les mouvements du bas sont exécutés à la hauteur du sol, les mouvements du milieu, à la hauteur du bassin et les mouvements du haut, à la hauteur des mains lorsqu'elles sont levées au-dessus de la tête (figure 2.6(b)). Chaque niveau est identifié par un patron de texture particulier.

Sur chaque niveau, le danseur peut exécuter un nombre précis de mouvements. Laban représente par neuf symboles différents les directions que peut prendre celui-ci (figure 2.6(a)). Chaque symbole possède une forme caractéristique que le danseur doit pouvoir identifier aisément. S'il est nécessaire de spécifier l'amplitude du geste à effectuer, le chorégraphe peut ajouter au symbole une annotation qui indique si le mouvement est plus ample ou plus rapproché du corps (figure 2.6(c)). Autrement, le danseur est libre d'interpréter à sa façon les gestes à réaliser.

Une des modifications au système originel de la labanotation fut de l'inclure sur une portée similaire à celle déjà utilisée en musique (figure 2.7(a)) [Hut84]. La portée de mouvement sépare la partie gauche de la partie droite du corps sur son plan sagittal. La portée spécifie les mouvements que le danseur peut exécuter avec ses bras, son corps,

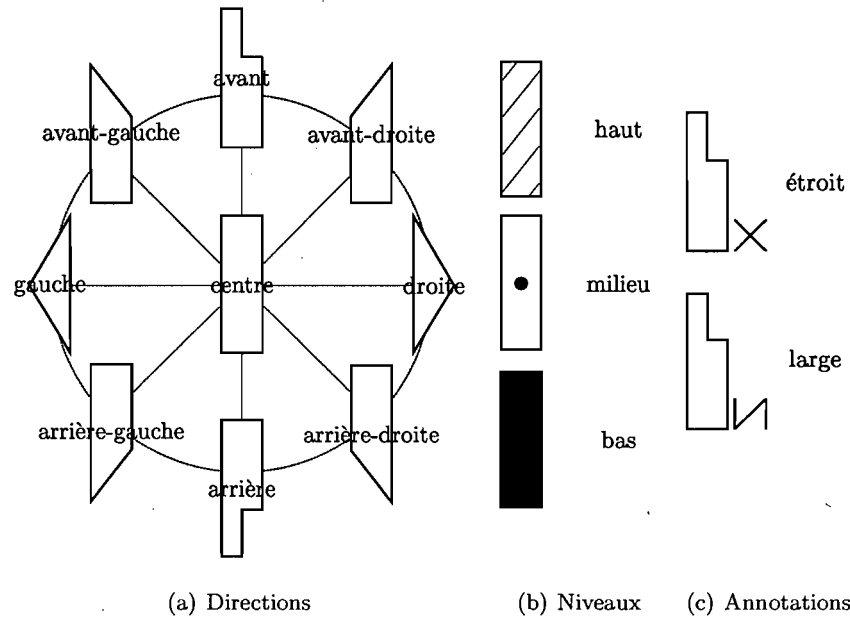


FIG. 2.6 – Pictogrammes utilisés dans la notation Laban. La forme du pictogramme représente la direction du mouvement alors que son patron de texture représente le niveau du mouvement.

ses jambes et sa tête. Pour les jambes, la portée se sépare en deux sections : une section spécifie les gestes de la jambe alors que l'autre spécifie les positions de support que prend l'autre jambe sur le sol pour conserver l'équilibre.

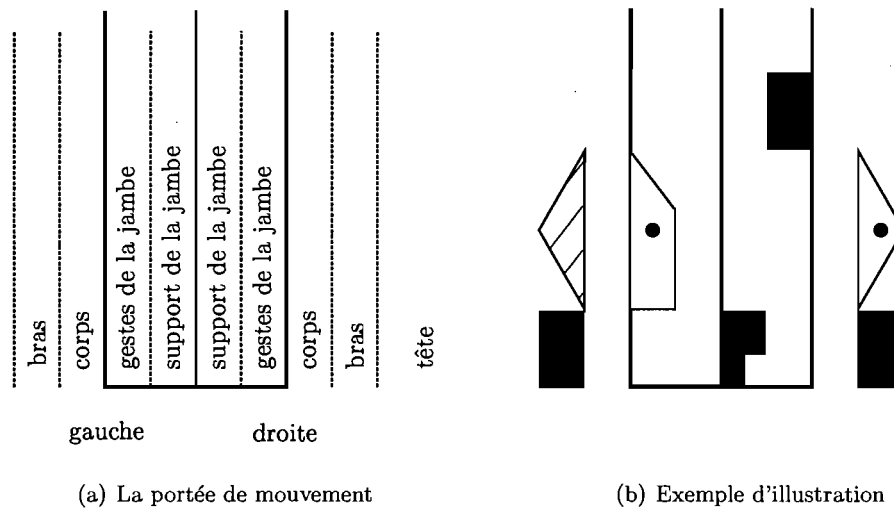


FIG. 2.7 – Utilisation de la portée de mouvement. Les symboles sont disposés temporellement sur la portée. L'exemple de la figure (b) illustre un danseur qui, les bras étendus sur les côtés, élève son pied gauche en avant à sa gauche à la hauteur de son bassin.

Sur la portée, plus les symboles sont allongés, plus le mouvement doit être lent. Pour faciliter la lecture temporelle, on utilise souvent la portée de mouvement conjointement avec la portée de musique.

## 2.5 Récapitulation

Dans ce chapitre, nous avons étudié brièvement divers standards d'illustrations visuels qui sont fréquemment utilisés en art et dans l'industrie. Nous n'avons fait qu'effleurer la surface des langages visuels contemporains les plus utilisés. De cette description surgit toutefois certaines caractéristiques communes aux langages visuels. Chaque langage établit une convention, plus ou moins rigoureuse, qui permet à tous, cultures confondues, de comprendre les idées qui sont véhiculées. Les langages visuels utilisent des pictogrammes et symboles qui se veulent intuitifs (bande dessinée) ou sinon des formes simples et faciles à identifier (chorégraphie).

Dans le chapitre 5 nous utiliserons certains de ces outils pour améliorer l'information temporelle de figures articulées. Ainsi, notre représentation n'utilise pas exclusivement les outils visuels d'un style d'illustration particulier, mais propose la combinaison de plusieurs outils pour permettre une meilleure reconnaissance perceptuelle et spatiale du mouvement.



## Chapitre 3

# Travaux antérieurs

Les recherches en informatique graphique prennent appui sur les techniques proposées au chapitre 2 pour améliorer l'information visuelle transmise par les images numérisées. Que ce soit par rendu 3D ou simplement par traitement d'image 2D, les techniques modernes de manipulation d'images parviennent à ajouter différents niveaux d'information à une représentation qui n'en contenait pas auparavant.

### 3.1 Techniques inspirées de la bande dessinée

Une grande part des recherches en informatique graphique se sont appliquées à apposer à même des animations et images statiques des indices visuels issus de la bande dessinée. C'est le cas des travaux réalisés par Masuch *et al.* [MSS99] qui furent parmi les premiers à suggérer des techniques d'analyse et d'illustration de lignes de vitesse pour des objets animés. En utilisant comme base les sommets constituant le maillage des objets, ils créent des lignes de vitesse pour illustrer le mouvement passé (figure 3.1). De plus, ils proposent des illustrations dérivées par répétition stroboscopique du modèle (figure 3.1(b)) et des illustrations partielles des contours pour amplifier le mouvement passé (figure 3.1(c)).

En s'inspirant de ce travail, Kawagishi *et al.* [KHK03] présentent des méthodes pour ajouter du flou de mouvement sur des objets 3D. En déformant les sommets sur le contour arrière (selon la direction du mouvement) de l'objet, ils obtiennent une nouvelle représentation exagérée de ce dernier qui donne l'information temporelle passée.

Joshi et Rheingans [JR05] proposent une approche différente par l'utilisation d'ob-

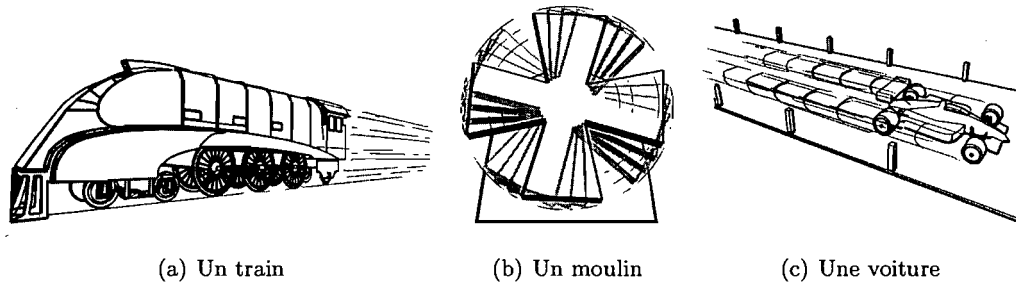


FIG. 3.1 – Ajout de lignes de mouvement inspirées de la bande dessinée sur des animations. Tiré de [MSS99].

jets voxelisés qui facilitent le traitement des données temporelles, ainsi que l'évaluation des occlusions des indices visuels avec l'objet. Ils proposent entre autres l'utilisation de rubans de vitesse [McC93] pour représenter le mouvement passé sur de plus longues périodes. Pour gérer les occlusions, ils intègrent des hachures à même le ruban pour rappeler grossièrement la forme des objets cachés. Finalement, ils proposent une utilisation similaire des lignes de vitesse et des silhouettes passées qui s'adaptent à leurs objets.

Dans leurs travaux, Collomosse *et al.* [Col04, CRH05, CH05] proposent des méthodes pour isoler, puis amplifier le mouvement de séquences vidéo avec divers indicateurs de mouvement. Ils proposent l'utilisation d'indicateurs d'augmentation soient les lignes de strie (lignes de vitesse), les lignes fantôme et le flou de mouvement (figure 3.2(a)). Les indicateurs d'augmentation ajoutent une information supplémentaire à une image statique, ou à même la vidéo. Par ailleurs, ils proposent l'utilisation de certains indicateurs de déformation qui sont communément utilisés en animation. Ainsi, l'écrasement et l'étirement d'un objet permettent d'amplifier respectivement l'impact et la vitesse de celui-ci dans l'animation (figure 3.2(b)). Bien que ces indicateurs n'amènent pas d'information précise sur la trajectoire du mouvement, ils aident à la compréhension générale de la séquence autant dans une animation que dans une image.

Collomosse *et al.* ne furent pas les premiers à proposer des indicateurs de déformation pour aider à véhiculer l'information temporelle de l'animation. Cette idée a d'abord été exploitée par Cheney *et al.* [CPIS02] qui ont proposé des méthodes de déformation pour les maillages 3D. À même un système de simulation physique, ils intègrent l'écrasement et l'étirement des objets par l'ajustement de deux constantes. L'objet ainsi déformé regagne graduellement sa forme originelle selon une énergie aussi spécifiée.

Plus récemment, Wang *et al.* [WDAC06] ont proposé de nouvelles méthodes pour

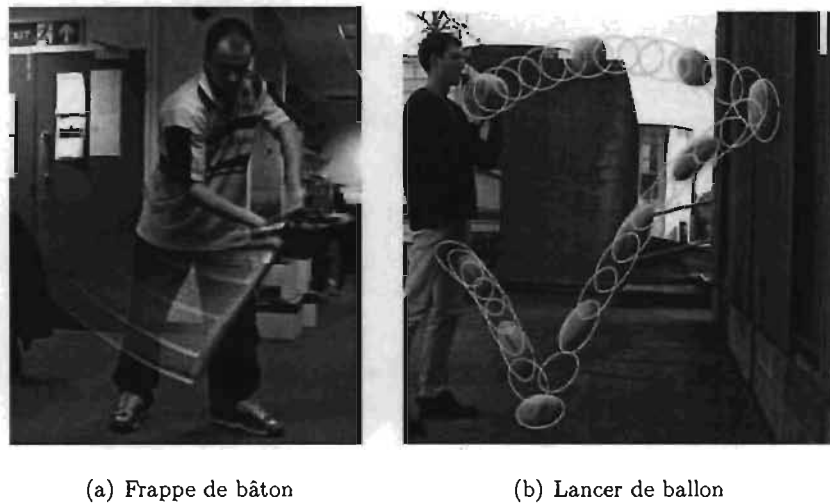


FIG. 3.2 – Ajout d’indicateurs de mouvement sur des séquences vidéo. Les indicateurs temporels peuvent ajouter de l’information à l’objet, ou bien le déformer. Tiré de [CRH05].

appliquer des déformations similaires à des objets animés, des images et des séquences de captures de mouvements squelettiques. Leur filtre, le laplacien de la gaussienne (*LoG*) du mouvement, amplifie l’anticipation de même que le suivi du mouvement pour donner une apparence de dessin animé aux figures articulées.

Pour permettre l’application d’indicateurs de mouvements à une plus grande plage d’animations sans avoir à explicitement analyser leur structure sous-jacente, Nienhaus et Döllner [ND03, ND05] proposent d’utiliser les graphes de scène et de bénéficier de leur description hiérarchique de la scène. Au graphe de scène, ils ajoutent un graphe de comportement qui intègre les événements (*e.g.* bulle pour texte du personnage) et aspects temporels que l’utilisateur veut ajouter à la scène. Ceci leur permet d’obtenir des résultats avec des objets simplistes (*e.g.* figure 3.3(a)) ou des structures hiérarchiques plus complexes (*e.g.* figure 3.3(b)). Bien que leur travail comporte des similarités avec les méthodes que nous proposons dans ce mémoire, nous concentrons nos efforts pour permettre une illustration automatique adaptée spécifiquement aux séquences de captures de mouvements squelettiques.

Pour certaines animations, il est parfois utile de donner un aperçu plus général de la séquence. Aussi, Agarwala *et al.* [ADA<sup>+</sup>04], dans leurs travaux sur le photomontage digital, proposent une extension pour regrouper en une seule image significative de

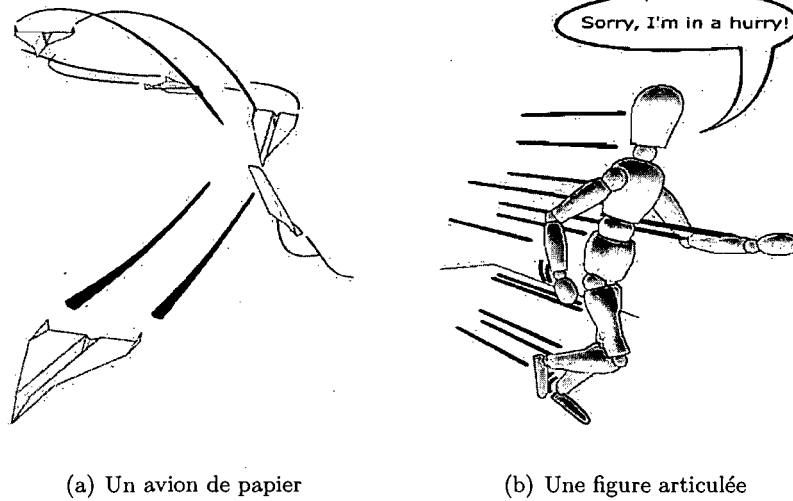


FIG. 3.3 – Ajout d’indicateurs de mouvement sur des données de graphe de scène. Les indicateurs peuvent représenter des mouvements ou des événements. Tiré de [ND05].

façon stroboscopique les images clés qui composent une séquence vidéo. Pour ce faire, ils utilisent un algorithme de coupure de graphe aidé par sélection interactive des régions d’intérêt, suivi d’une fusion des images sans couture selon les équations de Poisson.

Assa *et al.* [ACCO05] étendent la recherche des poses clés aux données de capture de mouvements. Leur méthode permet de trouver les poses les plus représentatives de la séquence complète (voir figure 3.4). Ils réduisent en premier lieu la dimensionnalité de la courbe de mouvement extraite des données de capture de mouvements. Ce faisant, ils arrivent à représenter le mouvement perceptuellement important par une seule courbe. Puis, ils isolent itérativement les poses clés de la séquence en identifiant les maxima locaux de la courbe de mouvement. Pour ce faire, ils calculent la différence entre chaque point de la courbe et la moyenne pondérée des points environnants.

Certains indicateurs de mouvement possèdent des propriétés beaucoup plus artistiques qu’informatives, mais n’en restent pas moins utiles pour plusieurs applications. C’est entre autres le cas du flou de mouvement, qui est communément utilisé en animation et en dessin pour amplifier l’apparence de mouvement. Sur ce sujet, les travaux de Brostow et Essa [BE01] doivent être mentionnés. Leur approche consiste à ajouter en post-traitement du flou de mouvement directionnel à une séquence vidéo. En premier lieu, ils isolent les blobs qui correspondent aux objets en mouvement. Ensuite, ils utilisent le flux optique de l’objet isolé pour calculer un filtre adaptatif qui se base sur



FIG. 3.4 – Segmentation des poses clés d’une séquence de capture de mouvements. Les poses clés peuvent être illustrées par une seule image, ou sous forme de bande dessinée. Tiré de [ACCO05].

l’amplitude du flux pour chaque pixel pour calculer une valeur de flou.

Plus récemment, Wheeler *et al.* [WTH06] proposent quelques solutions pratiques pour incorporer du flou de mouvement sur des objets 3D. Leur approche consiste à construire un plan de support qui hérite de la trajectoire de l’objet, puis de lancer des particules sur ce plan pour former des stries à l’arrière de l’objet.

D’un autre côté, Liu *et al.* [LTF<sup>+</sup>05] proposent une technique qui amplifie les mouvements subtils dans une séquence vidéo. Avec ce travail, ils prouvent que bien que le mouvement visible contienne beaucoup d’information intéressante, les faibles mouvements, imperceptibles à l’oeil, peuvent contenir autant d’information s’ils sont bien illustrés. Aidé par l’utilisateur, ils segmentent les différentes entités en mouvement de la séquence. Puis, ils amplifient la translation des pixels en mouvement par un facteur quelconque. Finalement, un algorithme de synthèse de texture résout les occlusions révélées par le mouvement.

Dans leur travail, Raskar *et al.* [RZW02] présentent des techniques pour reproduire un diorama temporel par projection dynamique sur un objet réel statique. Ainsi, ils introduisent plusieurs façons d’induire du mouvement où celui-ci n’existe pas a priori. Entre autres, en ajoutant dans la projection de l’environnement du cisaillement, ils arrivent à amplifier l’illusion d’accélération que prend un objet en mouvement dans

la scène. Aussi, pour simuler les surfaces cahoteuses, ils ajoutent des saccades à la projection.

### 3.2 Techniques inspirées du scénarimage

Bien que les travaux précédents donnent une bonne estimation du mouvement, il reste que celle-ci est beaucoup plus artistique que technique. Or, si l'utilisateur doit répéter la manoeuvre qui est décrite dans l'illustration, il a besoin de plus d'information. Dans cette optique, les scénarimages constituent un moyen pratique de communiquer l'information temporelle et technique d'une scène. À ce sujet, Dony *et al.* [DMR04, DMR05] introduisent des méthodes pour illustrer l'action présente dans une séquence vidéo par construction d'une mosaïque permettant de représenter l'action dans une seule image. Sur celle-ci, ils superposent les indices visuels nécessaires. Ainsi, ils répètent les objets et personnages en mouvement de façon stroboscopique pour aider à reconstruire la séquence. Puis ils ajoutent à l'arrière de ceux-ci leur silhouette qui donne à l'utilisateur une idée de la vitesse à laquelle se passe l'action.

Plus récemment, Goldman *et al.* [GCSS06] proposent plusieurs techniques qui améliorent la génération de scénarimages à partir de séquences vidéo (figure 3.5). Ils identifient manuellement les images d'intérêt dans la séquence vidéo, puis créent une mosaïque sans rotation pour éviter d'induire l'utilisateur en erreur sur le déplacement de la caméra. Ils proposent l'utilisation de la flèche de mouvement pour illustrer le déplacement des personnages, des objets et de la caméra. Leur flèche de mouvement indique clairement la trajectoire ainsi que la direction du mouvement, possède une épaisseur et supporte la torsion de sa géométrie.

### 3.3 Techniques inspirées du dessin technique

Alors que le scénarimage laisse encore au réalisateur la liberté d'interpréter dans une certaine mesure les informations qui y sont décrites, les instructions d'assemblage doivent habituellement être suivies à la lettre. Les instructions décrivent les pièces à assembler, l'ordre dans lequel elles doivent l'être et les outils à utiliser pour y arriver. Agrawala *et al.* [APH<sup>+</sup>03] introduisent des techniques pour reproduire à partir d'un objet complet les étapes nécessaires à la reconstruction de ce dernier. Ils proposent l'utili-



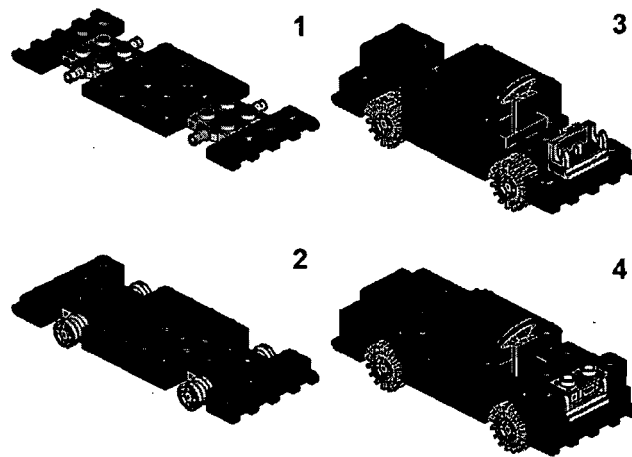
(a) Scénarimage provenant d'un artiste



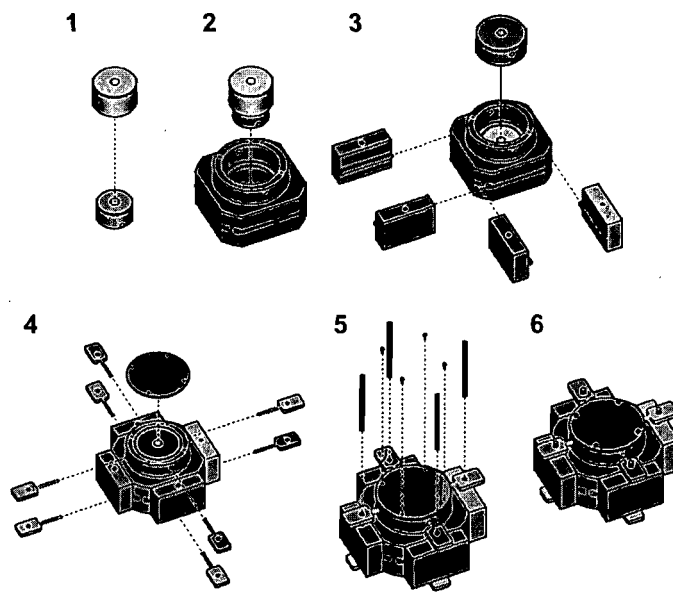
(b) Scénarimage tiré d'une séquence vidéo

FIG. 3.5 – Génération de scénarimages par utilisation de séquences vidéo. Les flèches représentent le mouvement des personnages et des objets, ainsi que de la caméra dans la scène. Tiré de [GCSS06].

sation conjointe de diagrammes structurels (figure 3.6(a)) qui affichent l'état courant de l'assemblage, et de diagrammes d'action (figure 3.6(b)) qui présentent les manoeuvres nécessaires à l'assemblage. Au diagramme d'action, ils ajoutent des indicateurs visuels qui aident l'utilisateur à effectuer la correspondance des pièces entre elles. Pour les pièces qui se joignent au tout par un seul point, ils lient les deux pièces par une ligne pointillée. Dans le cas contraire, ils utilisent une flèche de mouvement.



(a) Diagramme structurel



(b) Diagramme d'action

FIG. 3.6 – Instructions d'assemblage technique. Une représentation 3D par étapes de l'objet suffit habituellement pour assembler des objets simples (a). Des indicateurs visuels sont ajoutés à cette représentation si celle-ci nécessite éclaircissement (b). Tiré de [APH<sup>+</sup>03].



## Chapitre 4

# Hiérarchie

Dans ce chapitre, nous traitons d'abord de la hiérarchie squelettique utilisée pour la capture de mouvements. Ensuite, nous voyons comment il est possible d'utiliser cette hiérarchie pour extraire les données temporelles nécessaires à l'illustration de mouvements.

### 4.1 Capture de mouvements

La capture de mouvements est un procédé permettant de traduire le mouvement d'un acteur en données informatiques. De telles données représentent avec beaucoup plus de naturel les gestes divers d'êtres vivants. On dénombre quatre procédés de capture qui permettent d'acquérir les données temporelles de l'acteur : par méthode prothétique, acoustique, magnétique ou optique [Stu94]. La méthode prothétique est la plus complexe et nécessite que l'acteur se munisse de prothèses mécaniques. Cette méthode fournit toutefois des données de rotation très précises. La méthode acoustique utilise trois émetteurs audio et des récepteurs sur les membres de l'acteur pour trianguler ses positions dans l'espace. De façon similaire, la méthode magnétique utilise un seul émetteur centralisé et des récepteurs sur les membres de l'acteur et permet de récupérer position et orientation des récepteurs. Enfin, la méthode optique nécessite au moins trois caméras et un acteur muni de marqueurs qu'il est possible d'identifier automatiquement sur l'image.

Pour les besoins de ce mémoire, nous traitons de captures de mouvements pour figures articulées. Une figure articulée est un ensemble de joints reliés les uns aux autres. Le joint possède une position dans l'espace ainsi qu'une orientation. À ce joint, un os est

attaché et possède une longueur. L'os représente la distance entre deux joints inter-reliés.

Structurellement, les joints sont assemblés en commençant par un joint racine (*root joint*), duquel dépendent successivement tous les joints de la figure articulée. Une telle disposition crée une hiérarchie sous forme d'arbre. Nous démontrons dans la section 4.2 de quelle façon nous exploitons cette hiérarchie de façon à en extraire des données temporelles.

Pour animer les figures articulées, les séquences de captures de mouvements pré-enregistrées exploitent une série de poses clés habituellement échantillonnées à intervalle fixe. Une pose représente une configuration spécifique dans l'espace du squelette animé pour un temps donné de l'animation. Ainsi, en interpolant entre les différentes poses successives de la capture, on retrouve une animation continue qui conserve les mouvements particuliers de la séquence originelle (isolés dans les poses clés).

De nombreux standards de captures de mouvements sont utilisés dans l'industrie. Parmi les plus populaires, on compte le format de *Biovision* et celui d'*Acclaim*.

*Acclaim* sépare la hiérarchie et l'animation dans deux fichiers distincts pour son format de capture de mouvements [Stu94]. Dans le domaine du jeu vidéo, cette compagnie fait figure de précurseur pour son utilisation de captures de mouvements pour représenter des mouvements plus réalistes pour leurs personnages. Le fichier de hiérarchie ASF (*Acclaim Skeleton File*) entrepose les os du squelette ainsi que leur ordre de construction en partant de l'os racine de la hiérarchie. Dans cette hiérarchie, chaque os possède un nom, une direction, une longueur, une orientation ainsi que des degrés de liberté pour les trois axes de son référentiel. L'os racine fait exception à cette règle et contient une position dans l'espace, mais ne spécifie pas de longueur. Le fichier d'animation AMC (*Acclaim Motion Capture*) contient les poses discrétisées de l'animation. Pour chacune de ces poses, le fichier spécifie pour chaque os de la hiérarchie l'orientation de celui-ci. Pour l'os racine, on ajoute aussi la position dans l'espace.

Le standard de *Biovision* inclut la hiérarchie ainsi que l'animation dans un seul fichier BVH (*Biovision Hierarchy*). La première partie de ce fichier consiste en une description de la hiérarchie et est suivie des données de l'animation. Encore une fois, la hiérarchie commence par un os racine dont on spécifie la position dans l'espace. Pour les autres os de la hiérarchie, le fichier spécifie seulement leur position par rapport à leur parent et fait fi de leur référentiel et degrés de liberté. Aussi, pour chaque os, le fichier

doit spécifier les canaux qui seront utilisés dans l'animation, soient la translation en  $x$ ,  $y$  et  $z$ , et la rotation en  $x$ ,  $y$  et  $z$ .

## 4.2 Extraction de données temporelles

Pour une illustration statique, on ne conserve de la séquence de capture de mouvements qu'une pose à un moment précis  $t_i$  ainsi que toutes les poses de l'animation entre deux poses limites  $t_{i-}$  et  $t_{i+}$  qui serviront à l'analyse et l'illustration du mouvement.

Une pose statique peut être isolée automatiquement grâce à des algorithmes de sélection de poses clés [ACCO05], ou bien choisie manuellement par l'utilisateur. En ce qui concerne notre travail, nous avons choisi une sélection manuelle, car celle-ci permet d'isoler les poses statiques selon des critères que n'arrive pas toujours à couvrir une méthode automatique.

Une fois la pose statique isolée, il est nécessaire d'extraire l'information temporelle qui sera utilisée par les indicateurs de mouvements (chapitre 5). Nous expliquons d'abord comment extraire cette information pour un cas simplifié (section 4.2.1), puis comment étendre cette méthode pour supporter des figures articulées plus complexes (section 4.2.2).

### 4.2.1 Procédure d'extraction pour un cas simplifié

Prenons d'abord la procédure d'extraction de l'information temporelle pour un joint unique du squelette de capture de mouvements. Chaque joint est représenté par une position et une orientation dynamique dans le temps, et possède un os de longueur constante pour un squelette donné. De ce joint, on récupère les informations de translation et de rotation.

À partir du joint, on crée d'abord une courbe de mouvement qui se compose d'une séquence de points pris selon un ratio  $\gamma \in [0, 1]$  sur l'os entre les poses  $t_{i-}$  et  $t_{i+}$  (voir figure 4.1). On répertorie deux types de courbes de mouvement : globale et locale. Tout d'abord, la courbe de mouvement globale représente le mouvement dans les coordonnées spatiales du monde. La courbe de mouvement locale illustre le mouvement dans les coordonnées qui originent de la racine du joint (son axe d'orientation).

La courbe de mouvement permet de représenter toute translation du joint dans l'espace, de même que certaines rotations. Une rotation du joint autour de son axe

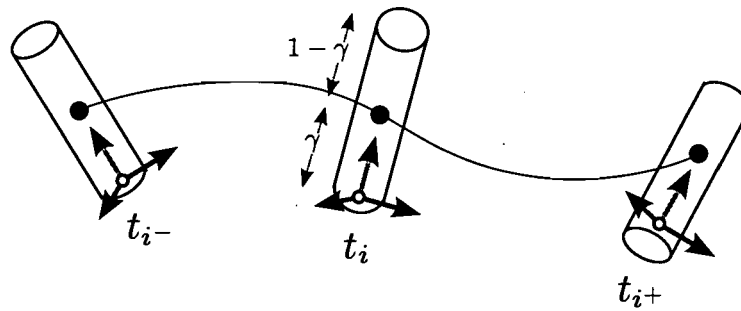


FIG. 4.1 – Extraction de la courbe de mouvement pour un joint unique.

longitudinal ne produit aucune translation dans l'espace. Par conséquent, nous isolons le roulement de celui-ci qui servira à l'analyse des rotations. Une rotation autour des deux autres axes sera interprétée comme une translation dans l'espace, et donc combinée aux translations entre  $t_{i-}$  et  $t_{i+}$ .

#### 4.2.2 Procédure d'extraction pour un cas généralisé

Bien que l'analyse d'un seul joint dans la figure articulée permette de retrouver les données temporelles associées à celui-ci, il est possible d'étendre cette extraction de façon à mieux représenter les différentes régions anatomiques de la figure articulée. Par ailleurs, une illustration de mouvement apposée à chaque joint du squelette créera une image finale beaucoup trop surchargée (voir figure 4.2).

Puisque les séquences de capture de mouvements sont organisées sous forme hiérarchique, il est possible d'isoler des régions de la figure articulée. De telles régions forment des groupements de joints desquels nous extrayons les informations temporelles de translation et de rotation.

Pour chaque groupe, il est nécessaire d'identifier un point d'analyse qui se situe sur la géométrie de la figure articulée et qui ne posera aucune ambiguïté lors d'une illustration de mouvement.

Pour ce faire, nous isolons du groupement sélectionné une séquence linéaire de joints qui débute à la racine locale de ce groupement. Une telle séquence forme un *chemin articulé* (en blanc à la figure 4.3), le plus long chemin (longueur des os) qu'il est possible d'isoler en partant de la racine locale. Selon la valeur de  $\gamma \in [0, 1]$ , un point d'analyse est choisi sur ce chemin. Grâce à cette valeur, il est possible de construire les courbes de mouvement tel qu'expliqué plus tôt à la section 4.2.1.

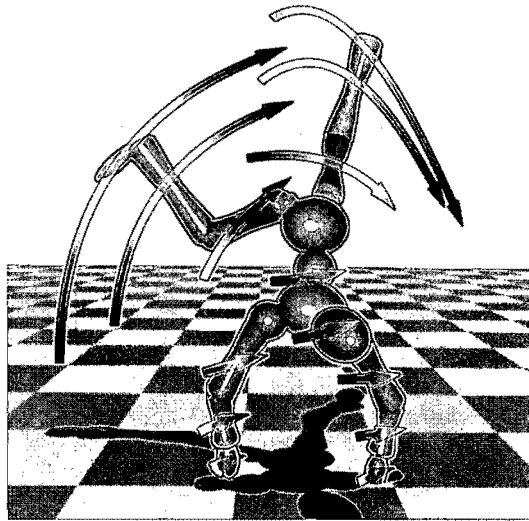


FIG. 4.2 – Exemple d’illustration utilisant l’information individuelle de chaque joint du squelette. Cette image met en scène un personnage qui fait la roue, sur lequel on a ajouté des flèches de mouvement (section 5.1). Bien que l’information temporelle soit bien illustrée sur cette image, elle surcharge l’image et nuit à cette information.

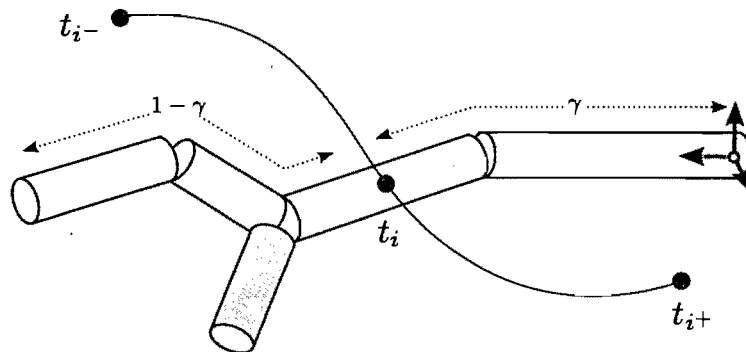


FIG. 4.3 – Extraction de la courbe de mouvement pour un groupement de joints.

Cette méthode de sélection du *chemin articulé* ne donnera pas de bons résultats pour certains groupements. Toute hiérarchie de joints qui présente de multiples chemins disjoints prédominants dans la structure du groupement résultera en un chemin articulé qui représente mal la géométrie de ce groupement. On peut penser à un groupement formant le haut du corps humain pour lequel les deux bras posent problème dans l’isolation d’un chemin articulé bien représentatif. Il en va de même pour une main et ses cinq doigts. Par conséquent, pour ces groupements, nous déterminons une position fixe qui représente suffisamment bien la géométrie mais qui n’est pas affectée par le paramètre  $\gamma$ .

Pour identifier les rotations à l'intérieur du groupement sélectionné, on utilise le référentiel attaché au joint de la racine locale. Encore une fois, on ne récupère que la valeur de roulement sur l'axe longitudinal de ce référentiel. Nous avons choisi ce référentiel, car il représente mieux la rotation du groupement complet que pourrait le faire une évaluation médiane de tous les référentiels. Si jamais le référentiel choisi n'arrive pas à bien représenter la rotation du groupement, alors il est possible de subdiviser ce groupement en sous-groupements plus précis (voir section 4.3).

### 4.3 Groupements hiérarchiques

Les groupements de joints décrits à la section 4.2.2 permettent d'obtenir des résultats jugés satisfaisants pour certains mouvements. Or, puisqu'il est nécessaire de procéder à une simplification des données de mouvements, cette méthode prendra mal en compte les mouvements internes au groupement même (flexion du bras par exemple lorsque le groupement comprend tout le bras).

Pour permettre d'ajuster l'illustration du mouvement selon la précision souhaitée, nous procédons à une organisation hiérarchique des groupements en différents niveaux de détails. Ainsi, en prenant pour entrée le groupement de joints originel, on subdivise récursivement le groupement en sous-groupements de joints logiques (voir figure 4.4). Cette approche se veut similaire à ce qu'effectue le cerveau de façon subconsciente dans son analyse du corps humain et autres corps articulés.

Cette subdivision des groupements de joints forme un arbre équilibré dans lequel chaque nœud correspond à un groupement. Ainsi, nous définissons le *nœud squelettique*, un nœud de cet arbre qui représente un seul groupement de joints et qui sera par la suite utilisé par les algorithmes d'analyse et d'illustration des indicateurs.

Cet arbre est construit de façon à ce que chaque nœud parent contienne les mêmes joints que contient l'ensemble de ses enfants. De cette façon, il est possible de s'assurer que chaque niveau de l'arbre englobe tous les joints du groupement originel. C'est cette particularité de l'arbre qui le contraint à être équilibré. Aussi, si un groupement de joints parmi d'autres ne nécessite plus de subdivision hiérarchique, celui-ci doit être répété dans les niveaux subséquents de l'arbre.

Une telle représentation facilite la sélection d'un niveau de précision pour l'illustration du mouvement. Ainsi, dépendamment de l'animation, l'utilisateur peut choisir les

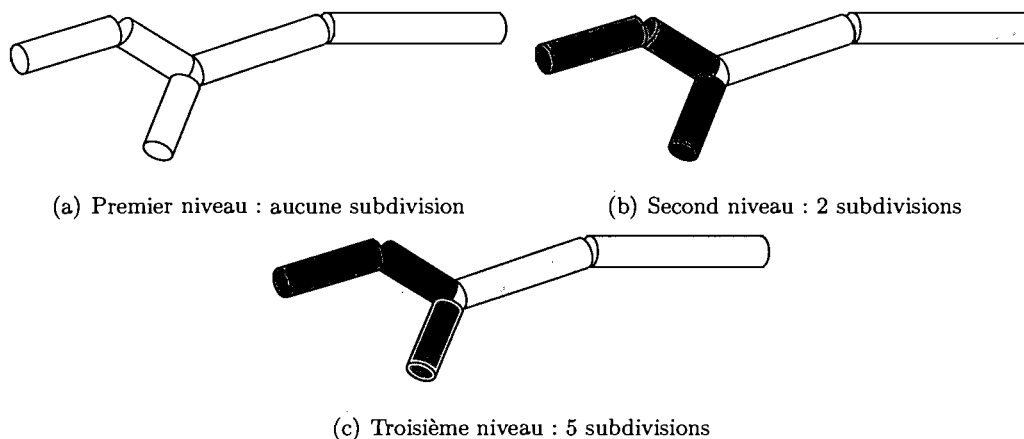


FIG. 4.4 – Subdivision possible du groupement de joints. Il est possible de subdiviser les groupements jusqu'à obtenir des joints uniques comme le démontre (c). Toutefois, on peut vouloir conserver des groupements intacts si ceux-ci ne contribuent pas suffisamment à l'évaluation du mouvement.

premiers niveaux de la hiérarchie s'il désire une illustration plus générale qui représente le squelette dans son tout. Sinon, il peut choisir les niveaux plus avancés de l'arbre s'il désire une illustration qui prend en compte les mouvements spécifiques des joints. Généralement, pour la plupart de nos illustrations, nous avons choisi un niveau d'illustration plus avancé (avant-dernier niveau) qui permet une représentation précise du mouvement sans toutefois non plus illustrer chaque joint du squelette.

#### 4.4 Groupements hiérarchiques pour un squelette humain

Notre méthode par groupements est suffisamment robuste pour représenter adéquatement toute forme de séquences de captures de mouvements squelettiques. Or, pour notre travail, il nous a surtout été donné de manipuler des séquences qui représentent des personnages humains. En effet, ce type de données est beaucoup plus facile à produire que des séquences de captures animales, et bénéficient par ailleurs d'une utilisation industrielle croissante.

Nous définissons donc ici pour le squelette humain des groupements hiérarchiques qui segmentent le corps humain en groupes perceptuellement représentatifs. Tel qu'illustré par la figure 4.5, l'arbre composé par les groupements hiérarchiques du squelette humain standard possède quatre niveaux de détails. Le premier niveau représente le squelette

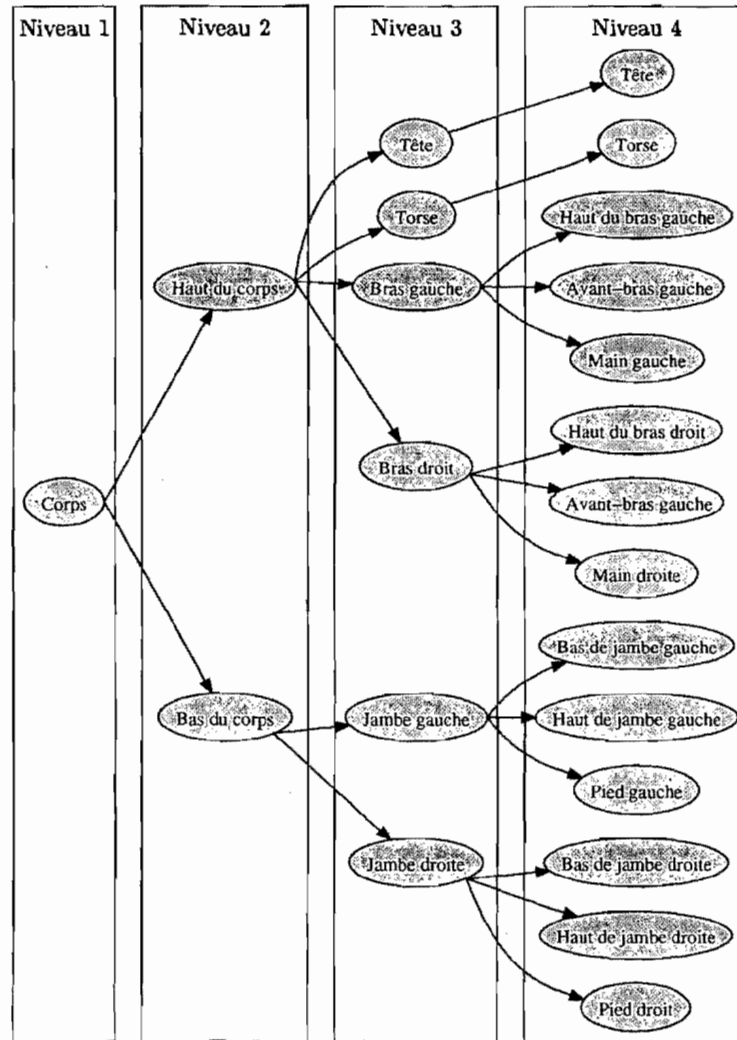


FIG. 4.5 – Groupements hiérarchiques appliqués au squelette humain. Cet arbre a été créé manuellement pour les échantillons de captures de mouvements squelettiques mis à notre disposition.



dans son tout. Ce niveau ne change jamais, peu importe la hiérarchie qui est traitée. Le deuxième niveau sépare le corps en deux groupes, le haut du corps et le bas du corps. Le troisième niveau isole les membres du corps dans des groupements différents et isole aussi la tête et le torse. Ce niveau représente une segmentation précise du corps qui conserve tout de même une certaine généralité. La plupart des exemples illustrés au chapitre 6 réfèrent à ce niveau de précision. Enfin, le quatrième niveau est notre séparation maximale jugée nécessaire pour nos illustrations du squelette humain. Ici, on sous-segmente les membres du squelette. La tête et le torse sont répétés sans être subdivisés. Une telle approche permet d'obtenir l'arbre balancé nécessaire pour conserver tous les joints du squelette dans chaque niveau. On ne subdivise pas le torse, car celui-ci ne contribue pas suffisamment au mouvement pour nécessiter un niveau de détails supplémentaire. De plus, il n'est pas possible de fournir un niveau de détails supérieur pour les mains et les pieds du squelette, car les séquences de captures de mouvements utilisées ne fournissent pas cette information. Toutefois, notre méthode supporte l'illustration de telles hiérarchies.

## Chapitre 5

# Indicateurs de mouvements

L'indicateur visuel est un outil habituellement non-photoréaliste qui clarifie l'information véhiculée par une image. L'indicateur de mouvements, tant qu'à lui, est une sous-classe d'indicateurs visuels qui améliore l'information temporelle d'une image statique, qui à toute fin propre, ne contient aucune donnée temporelle.

Dans ce chapitre, nous introduisons d'abord une série d'indicateurs de mouvements qui, lorsqu'utilisés conjointement, permettent de mieux reconstituer l'action entreprise par un personnage dans une pose statique d'une séquence de capture de mouvements. Pour chaque indicateur de mouvements, nous expliquons la procédure nécessaire à son analyse à partir des données temporelles extraites de la séquence de capture. Par la suite, nous expliquons comment il est possible de construire la géométrie de cet indicateur pour qu'il se conforme à la position de la caméra ainsi qu'à la géométrie propre du personnage.

La flèche de mouvement (section 5.1) est notre indicateur qui fournit la meilleure représentation de mouvement que nous avons synthétisé lors de notre travail (voir tableau 5.1). Outre le chemin parcouru et la direction du mouvement que celle-ci représente par sa nature même, la géométrie de la flèche de mouvement peut s'augmenter d'information supplémentaire. Ainsi, on peut aisément ajouter des détails comme la vitesse du mouvement ainsi que son importance visuelle en modifiant les paramètres de la flèche.

L'onde de bruit (section 5.2), à l'opposé de la flèche de mouvement, ne permet pas de représenter le mouvement avec autant de précision (voir tableau 5.1). Au contraire, elle sera utilisée pour souligner les mouvements de faible amplitude. Un tel indicateur s'avère utile pour tout mouvement incertain, pour les hésitations du personnage et autres mouvements qui n'affichent pas de trajectoires précises. Utilisées conjointement,

les flèches de mouvement et les ondes de bruit représentent adéquatement une grande plage de mouvements.

À ces deux indicateurs, nous ajoutons aussi le suivi stroboscopique (section 5.3). Cet indicateur se veut une précision du mouvement déjà illustré par les flèches de mouvement. Aussi, cet indicateur doit être particulièrement discret pour ne pas encombrer l'information déjà présente. En outre, par sa décomposition en poses discrètes, le suivi stroboscopique donne un surplus d'information sur les mouvements plus complexes que ne donnent pas les autres indicateurs. Le tout crée une représentation perceptuellement identifiable du mouvement [Cut02] qui n'utilise aucun symbole technique.

Indicateur	Caractéristique			
	Position	Direction	Vitesse	Accélération
Flèche de mouvement	✓	✓	✓	✓
Onde de bruit	–	✓	–	–
Suivi stroboscopique	✓	✓	~	~

TAB. 5.1 – Caractéristiques accentuées par les indicateurs de mouvements. Un indicateur peut donner une très bonne idée (✓) sur une caractéristique du mouvement, une idée vague (~) ou aucune indication (–). La flèche de mouvement fournit la meilleure représentation du mouvement, mais ne donne aucune information utile pour les mouvements de faible amplitude que l'onde de bruit parvient à illustrer. Le suivi stroboscopique donne des informations spatiales plus complètes que la flèche de mouvement, mais risque d'encombrer l'image. Des notions de vitesse et d'accélération peuvent être déduites avec la distance entre chaque réplique stroboscopique.

Nous avons concentré notre travail à illustrer avec une certaine précision et avec esthétisme le mouvement extrait d'une pose statique dans une séquence de capture de mouvements. Or, il existe d'autres représentations du mouvement qui font une utilisation plus généralisée de l'information donnée par la séquence de capture. Nous illustrons d'abord comment illustrer le mouvement en utilisant les multiples poses clés de l'animation (section 5.4.1). Ensuite, nous décrivons les techniques nécessaires pour isoler, puis illustrer les traces de pas du personnage se déplaçant (section 5.4.2).

## 5.1 Flèche de mouvement

Les flèches de mouvement représentent avec une certaine précision deux transformations rigides : les translations et les rotations (roulements). Nous considérons que ces deux transformations sont suffisantes pour l'illustration de mouvements dans les séquences de capture de mouvements.

La flèche de mouvement a une représentation plus technique qui permet donc une plus grande précision d'illustration que certains indicateurs hérités de la bande dessinée comme les lignes de strie, les lignes fantôme [CRH05], le flou de mouvement [BE01, KHK03] ou le cisaillement dynamique [RZW02].

### 5.1.1 Analyse de la flèche de mouvement

L'utilisateur doit d'abord isoler une pose statique à un temps  $t_i$  de la séquence animée qu'il désire illustrer. En utilisant les groupements hiérarchiques définis à la section 4.3, l'utilisateur choisit le niveau de détails auquel il désire faire l'illustration. Pour nos exemples, les niveaux plus avancés (plus détaillés) fournissent habituellement une illustration jugée plus satisfaisante pour la plupart des séquences. Pour le niveau sélectionné, chaque *noeud squelettique* permet la création d'au plus une flèche de mouvement. Cette flèche représente l'information temporelle du noeud squelettique entre les poses clés limites  $t_{i-}$  et  $t_{i+}$ .

L'algorithme de création de la flèche de mouvement doit déterminer s'il crée une flèche pour le *noeud squelettique* sous analyse et si c'est une flèche de rotation ou de translation (voir algorithme 1).

L'algorithme utilise les courbes de mouvement locale  $C_l(t)$  et globale  $C_g(t)$  qui passent par le point situé à distance calculée selon le ratio  $\gamma$  sur le groupement de joints identifié par le *noeud squelettique*. Les courbes de mouvement permettent d'identifier les translations dans le mouvement ainsi que certaines rotations (tangage et lacet). Puisque les translations sont prédominantes dans le mouvement, nous déterminons d'abord s'il est possible de créer une flèche de translation en utilisant l'information de la courbe de mouvement locale. Nous voulons évaluer l'amplitude avec laquelle le groupement de joints s'est déplacé par rapport à son joint racine local. Pour ce faire, nous basons nos critères de sélection sur la longueur de la courbe, ainsi que sa vitesse moyenne et son accélération moyenne. Cette analyse favorise les courbes plus longues et de vitesse et

---

**Algorithme 1** : créerFlèche( $t$ )

---

```

début
  si longueur( $C_l(t)$ ) >  $l$  alors
    si  $C_l'(t_i) > v$  ou  $C_l''(t_i) > a$  alors
       $C_{tr}(t) \leftarrow \text{fitMoindresCarrésQuadratique}(C_g(t))$ 
      construireFlèche( $C_{tr}(t)$ )
    sinon
       $r_{max} = \max \left( \text{roulement} \left( Q(t_1) Q(t_2)^{-1} \right) \right) \quad \forall t_1, t_2 \in [t_{i-}, t_{i+}]$ 
      si  $r_{max} > r$  alors
         $C_{rot}(t) \leftarrow \text{construireArcCercle}(\rho, \varphi, Q(t_i))$ 
        construireFlèche( $C_{rot}(t)$ )
fin

```

---

accélération plus grandes.

Pour évaluer les rotations du groupement de joints représenté par le *noeud squelettique*, nous utilisons les valeurs des quaternions entre les poses limites  $t_{i-}$  et  $t_{i+}$ . Bien qu'une courbe de mouvement arrive à représenter certaines rotations des joints du squelette, celle-ci ne peut illustrer la rotation du joint sur son axe longitudinal (roulement). Ainsi, nous représentons cette rotation particulière par une flèche de rotation appropriée pour laquelle on doit évaluer l'amplitude du roulement du groupement de joint entre les poses limites  $t_{i-}$  et  $t_{i+}$ . On représente celle-ci par l'angle de roulement maximal entre les quaternions compris entre les deux poses limites.

### 5.1.2 Construction de la flèche de mouvement

Une fois choisi le type de flèche qu'il est nécessaire d'apposer au *noeud squelettique* sous analyse, nous générons une nouvelle courbe de mouvement qui servira de support à la construction de la flèche.

Pour les flèches de translation, nous calculons la courbe de support en procédant à une approximation de la courbe de mouvement globale du *noeud squelettique* par une fonction quadratique. Une interpolation par moindres carrés de la courbe de mouvement originelle donne des résultats satisfaisants. Nous considérons qu'une fonction quadratique véhicule suffisamment d'information pour illustrer les mouvements d'une

pose statique. De plus, la fonction quadratique donne une représentation esthétique de la flèche, tout en conservant la flexibilité que nous désirons. Les tests entrepris avec des fonctions d'ordres supérieurs furent beaucoup moins concluants.

Les flèches de rotation utilisent l'information du référentiel attaché au groupement de joints pour la pose statique  $t_i$ . Nous construisons une courbe de mouvement qui fait un arc de cercle autour de ce référentiel à la position  $\gamma$  sur la géométrie du groupement de joints. Cet arc de cercle sert lui aussi de support à la construction de la flèche qui illustre le roulement du personnage sur son axe longitudinal. L'angle de l'arc de cercle  $\varphi$  est un paramètre que l'utilisateur peut choisir (voir figure 5.2(b)). Ainsi, cet angle n'est pas nécessairement égal à la valeur de rotation utilisée pour l'analyse. Nous préférons ne pas utiliser cet angle pour l'illustration, car les valeurs de rotation au niveau des joints fluctuent de pose en pose et ne donnent pas nécessairement la représentation attendue. Quant au rayon de l'arc  $\rho$ , il dépend directement de la géométrie du personnage autour duquel il est attaché. Pour déterminer cette valeur, nous utilisons la distance maximale entre l'axe de chaque joint sur le *chemin articulé* du *noeud squelettique* et la géométrie qui y est attachée.

La géométrie de la flèche de mouvement suit la courbe de support créée pour chaque flèche. Pour les flèches de mouvement, nous proposons une géométrie planaire qui permet une meilleure flexibilité. Notre méthode de construction assure une robustesse de la géométrie selon le point de vue. Ainsi, nous souhaitons toujours afficher la flèche de façon à ce que la totalité ou sinon la majorité de sa surface soit orientée vers l'utilisateur, lui donnant ainsi la meilleure visibilité sur l'information véhiculée par la flèche. Pour ce faire, nous divisons la construction de la flèche en segments qui sont tous orientés de manière optimale vers l'observateur (voir algorithme 2).

Ainsi, pour chaque segment de la flèche, nous cherchons à évaluer le vecteur  $\vec{w}$  qui détermine le plan sur lequel construire la géométrie de la flèche. La valeur de ce vecteur est le résultat du produit vectoriel entre le vecteur tangent au segment  $\vec{t}$  et le vecteur de vue  $\vec{V}$  (voir figure 5.1). Pour éviter les dégénérescences du produit vectoriel lorsque le vecteur de vue  $\vec{V}$  devient parallèle au vecteur tangent  $\vec{t}$ , nous fixons la valeur de  $\vec{w}$  pour le segment ainsi que tous les segments subséquents à celui-ci. Cette approche est nécessaire, car il est difficile de conserver un affichage lisse des segments entre eux si, lors des dégénérescences du produit vectoriel, nous figeons la disposition des segments

**Algorithme 2** : *construireFlèche*( $C(t)$ )**début**dégénéré  $\leftarrow$  faux**pour chaque** segment  $j$  de la flèche fairesi  $(\vec{t}_j \cdot \vec{V}_j) > \text{seuil}$  et dégnéré = faux alors|  $\vec{w}_j \leftarrow \vec{t}_j \times \vec{V}_j$ 

sinon

|  $\vec{w}_j \leftarrow \vec{w}_{j-1}$ | dégnéré  $\leftarrow$  vrai| illustrerSegment( $\vec{w}_j$ )**fin**

problématiques. De plus, pour favoriser un affichage planaire de la tête de flèche, qui est la partie la plus représentative de cet indicateur, nous commençons notre construction itérative de la tête jusqu'à la queue de flèche. Bien que notre algorithme de construction nous permette d'obtenir une géométrie adaptative, il rend impossible aux flèches de mouvement d'afficher des torsions qui pourraient contribuer à l'information déjà véhiculée par cet indicateur.

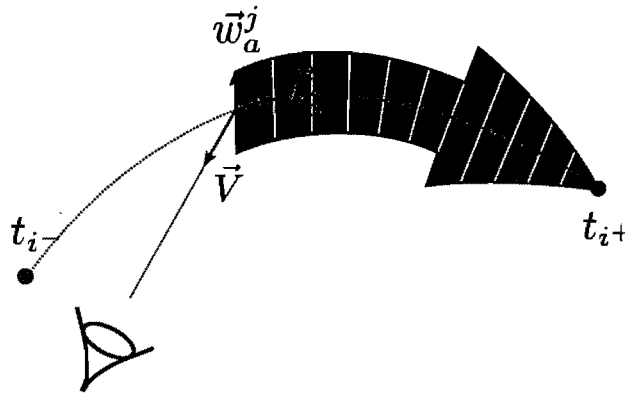


FIG. 5.1 – Procédure de construction d'un segment de flèche.

Pour les flèches de translation, nous utilisons la couleur pour transmettre de l'information supplémentaire. Un gradient de couleur représente par la saturation la vitesse relative du groupement tout le long de sa courbe de mouvement (voir figure 5.2(a)). Nous déterminons d'abord la vitesse minimale et maximale sur la courbe de mouve-

ment. L'évaluation de la couleur appliquée à chaque segment est une fonction linéaire définie par les deux extrêmes. Par conséquent, le gradient de couleur représente la vitesse propre à la courbe de mouvement sous évaluation et non à la vitesse globale de toutes les courbes.

Bien que la géométrie de la flèche de mouvement soit correctement orientée par rapport à la caméra, encore faut-il qu'elle ne soit pas cachée par le personnage sur lequel elle est apposée. Nous nous assurons que la flèche de mouvement soit visible en tout temps. Pour ce faire, nous procédons au rendu du personnage dans la scène en deux étapes. En premier lieu, toutes les flèches de mouvement sont dessinées dans le tampon pochoir (*stencil buffer*). Par la suite, on dessine la géométrie du personnage avec transparence si le pochoir est à "1" et totalement opaque si le pochoir est à "0" (sans flèche). Ce traitement particulier n'est pas appliqué pour les répliques stroboscopiques du personnage puisque celles-ci sont toujours dessinées avec transparence.

La géométrie de la flèche de mouvement peut être changée. Nous laissons un certain nombre de paramètres sous le contrôle de l'utilisateur (voir figure 5.2).

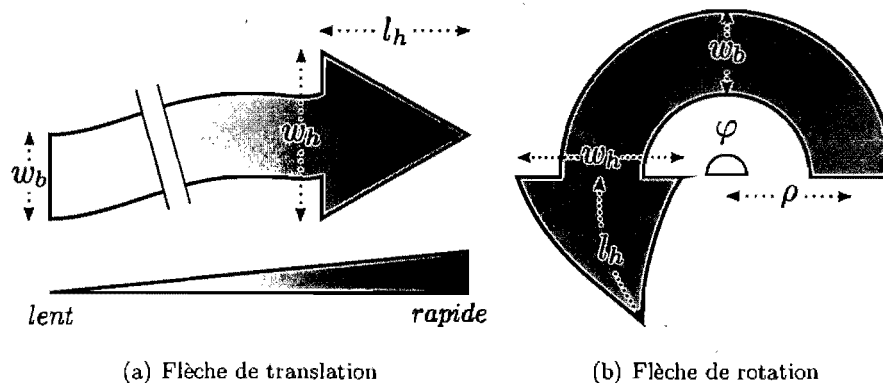


FIG. 5.2 – Paramètres de construction des flèches de mouvement. L'utilisateur peut modifier la largeur du corps  $w_b$ , la largeur de la tête  $w_h$  ainsi que la longueur de la tête  $l_h$  pour les deux types de flèches. Dans notre implémentation toutefois, ces paramètres sont par défaut proportionnels de façon à ce que  $4w_b = 2w_h = l_h$ . Pour la flèche de rotation, l'utilisateur a le contrôle sur l'angle de l'arc  $\varphi$ . Le paramètre  $\rho$  dépend de la géométrie du personnage.



## 5.2 Onde de bruit

L'onde de bruit est un indicateur qui ajoute de l'information visuelle là où autrement l'image reste ambiguë. On peut relier l'onde de bruit à la catégorie des lignes d'action qui sont utilisées en bande dessinée. Plus précisément, on retrouve souvent les ondes de bruit pour illustrer les petits mouvements, les tremblements ou chocs du personnage [McC93, DMR05, CRH05]. De ce fait, cet indicateur ne se veut pas précis. Il ne peut donner une indication claire de la direction du mouvement, ni de sa vitesse. On ne veut ici que mettre en emphase les mouvements qui autrement ne pourraient être perçus [LTF<sup>+</sup>05].

### 5.2.1 Analyse de l'onde de bruit

Comme pour les flèches de mouvement, nous isolons une pose statique qui nous intéresse à un temps  $t_i$  quelconque. De plus nous sélectionnons un niveau de la hiérarchie auquel nous désirons faire l'illustration. Nous nous penchons ici uniquement sur l'analyse de la courbe de mouvement globale à laquelle réfère le *noeud squelettique*.

Pour parvenir à illustrer les petits mouvements du squelette animé, nous isolons d'abord les courbes de mouvement de faible amplitude spatiale. Nous construisons une boîte englobante alignée sur les axes cartésiens autour de la courbe de mouvement. Comme mesure d'amplitude spatiale, nous utilisons la longueur de la diagonale  $d$  de cette boîte (voir figure 5.3).

Nous considérons un mouvement comme subtil si son amplitude spatiale est supérieure au seuil  $th_{min}$  qui sépare du bruit contenu dans les données de la capture de mouvements, mais inférieure au seuil  $th_{max}$  au-dessus duquel le mouvement est sujet à une illustration plus avancée comme les flèches de mouvement (voir algorithme 3).

Pour les mouvements qui satisfont les critères de sélection, on détermine la direction générale du mouvement. Cet indicateur ne peut donner une notion précise de mouvement comme il a déjà été mentionné plus tôt. Ainsi, on ne fait qu'approximer la direction par interpolation par moindres carrés linéaire. De la fonction interpolée, on extrait le vecteur direction  $\vec{v}$  qui servira de support de construction pour l'onde de bruit.

Aussi, il est nécessaire de déterminer selon les données extraites du mouvement si celui-ci est unidirectionnel ou bidirectionnel. Pour ce faire, on calcule les directions du mouvement passé  $\vec{v}_-$  et du mouvement futur  $\vec{v}_+$  encore une fois par interpolation par

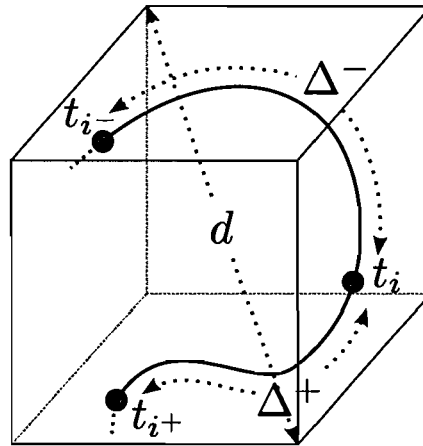


FIG. 5.3 – Analyse de la courbe de mouvement pour l'illustration des ondes de bruit. Nous utilisons la valeur de la diagonale  $d$  comme mesure d'amplitude spatiale. La courbe de mouvement est divisée en deux parties, soit la courbe de mouvement passée entre  $t_{i-}$  et  $t_i$ , et la courbe de mouvement future entre  $t_i$  et  $t_{i+}$ .

---

**Algorithme 3** : *créerOndeDeBruit*( $t$ )

---

début

$b \leftarrow \text{boîteEnglobante}(C_g(t))$

$d \leftarrow \text{diagonale}(b)$

    si  $th_{min} < d < th_{max}$  alors

$\vec{v} \leftarrow \text{fitMoindresCarrésLinéaire}(C_g(t))$

$\vec{v}_+ \leftarrow \text{fitMoindresCarrésLinéaire}(C_g(t)) \quad \forall t \in [t_{i-}, t_i]$

$\vec{v}_- \leftarrow \text{fitMoindresCarrésLinéaire}(C_g(t)) \quad \forall t \in [t_i, t_{i+}]$

        si  $(\vec{v}_- \cdot \vec{v}_+) > 0$  alors

            |  $\text{construireOndeDeBruit}(\vec{v}, \text{unidir})$

        sinon

            |  $\text{construireOndeDeBruit}(\vec{v}, \text{bidir})$

fin

---

moindres carrés linéaire. Si les deux portions de la courbe de mouvement vont dans la même direction, alors on crée une onde de bruit unidirectionnelle, et une onde de bruit bidirectionnelle dans le cas contraire.

### 5.2.2 Construction de l'onde de bruit

La construction de l'onde de bruit se sert directement de la géométrie attachée au squelette de capture de mouvements. De cette géométrie, nous extrayons le contour qui est répété  $n_w$  fois avec un facteur agrandissant. Le contour est ajusté selon la direction du mouvement, le type d'onde (unidirectionnel ou bidirectionnel) et le point de vue de la caméra (voir algorithme 4).

---

**Algorithme 4** : *construireOndeDeBruit* ( $\vec{v}$ , *type*)

---

```

type ← {unidir, bidir}
début
  pour chaque joint j du groupement faire
    c ← contour (j)
    pour k ← 1 à  $n_w$  faire
       $c_k$  ←  $M_s c$ 
      pour chaque point l du contour  $c_k$  faire
         $\alpha_l$  ←  $(1 - (\vec{V} \cdot \vec{v}))$ 
        si  $|p(y)_l| > (\beta \Delta y / 2)$  alors
           $\alpha_l$  ← 0
        si type = unidir et  $(\vec{v} \cdot \vec{n}_l) > 0$  alors
           $\alpha_l$  ← 0
      illustrerContour ( $c_k$ )
fin
```

---

L'algorithme procède d'abord à l'évaluation du contour pour la géométrie associée à chaque joint individuel dans le *noeud squelettique* sous analyse. Lors de son passage dans l'algorithme, cette géométrie est centrée à l'origine et alignée sur les axes  $x, y, z$  de façon à faciliter le traitement. Par la suite, lors du rendu final, nous multiplions la géométrie par les matrices correspondantes.

Pour isoler le contour, nous appliquons une variante de l'algorithme proposé par Lander [Lan00]. Nous effectuons un rendu de la géométrie en deux étapes, qui vise à laisser transparaître les discontinuités dans la géométrie (voir figure 5.4). Nous affichons d'abord les faces avant avec maillage plein, mais entièrement transparent. Ce premier rendu a pour but d'inscrire dans le tampon de profondeur les informations relatives à

la géométrie sans l'afficher à l'écran. Le deuxième rendu affiche les faces arrière avec maillage vide (les arêtes seulement). La majeure partie de ce maillage se situe à l'arrière de la géométrie affichée précédemment et n'apparaîtra pas à l'écran. Toutefois, les arêtes aux abords des discontinuités de la géométrie ainsi que son contour ne seront pas cachés par les faces avant. Cette technique ne nous donne pas un contour précis, mais a l'avantage d'être applicable en temps réel et ne nécessite aucun prétraitement de géométrie.



(a) Le maillage avant plein      (b) Le maillage arrière vide      (c) Combinaison

FIG. 5.4 – Affichage du contour sur une géométrie. Le contour accentue la silhouette de la géométrie (ici le *teapot*) et en améliore la perception.

Une fois le contour isolé, nous agrandissons celui-ci pour produire  $n_w$  ondes autour de la géométrie (voir figure 5.5(a)). Pour ce faire, les points qui constituent le contour sont multipliés par une matrice d'agrandissement  $M_s$ . Cette matrice utilise les dimensions  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  et  $\Delta z$  de la boîte englobante de la géométrie pour calculer un facteur d'agrandissement adéquat. Une distance de  $\epsilon$  dans l'espace monde sépare chaque onde. Cette valeur est intégrée à la matrice et multipliée par le numéro de l'onde  $k \in [1, n_w]$ .

$$M_s = \begin{bmatrix} (\Delta x/2 + k\epsilon)/(\Delta x/2) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & (\Delta y/2 + k\epsilon)/(\Delta y/2) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & (\Delta z/2 + k\epsilon)/(\Delta z/2) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Pour chaque onde, nous déterminons les portions qui doivent être laissées visibles. Nous calculons pour chaque point du contour une valeur de transparence  $\alpha_l$  avec laquelle nous ajustons l'importance de certaines parties du contour.

En premier lieu, nous évaluons la disposition de l'onde par rapport au vecteur de vue  $\vec{V}$  de la caméra. Nous voulons éviter de générer de l'information fausse, ce qui se produit invariablement lorsque la direction du mouvement  $\vec{v}$  devient parallèle au vecteur de vue  $\vec{V}$ . Dans un tel cas, le mouvement est encore présent, mais les ondes

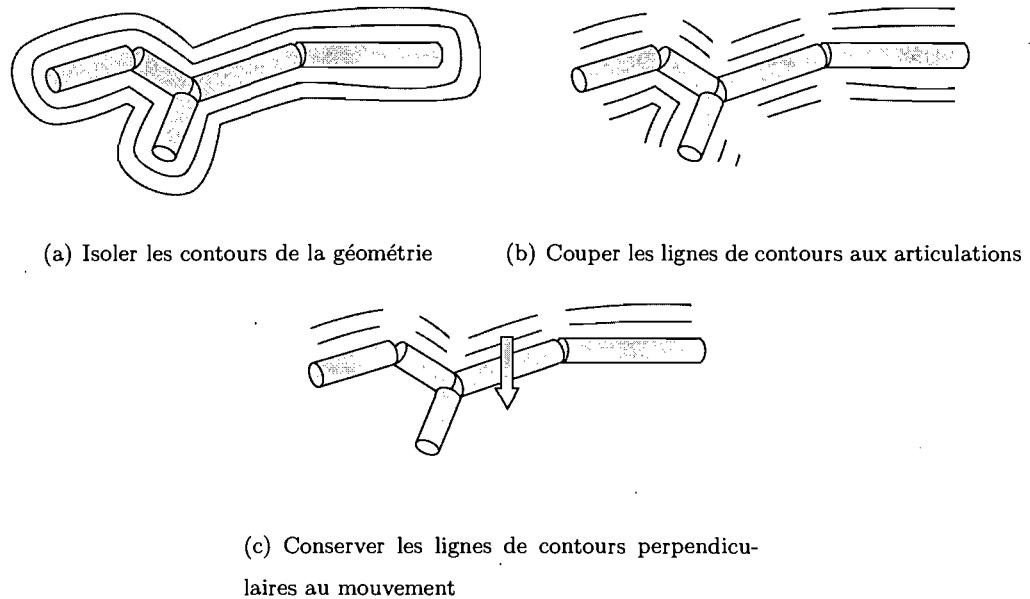


FIG. 5.5 – Construction de l'onde de bruit.

laissent supposer un mouvement qui est perpendiculaire à ce qu'il devrait normalement être. Pour régler ce problème, nous évaluons la projection du vecteur de mouvement  $\vec{v}$  sur le vecteur  $\vec{V}$ . Ces deux vecteurs étant normalisés, la longueur du vecteur projeté se situe entre  $[0, 1]$ . La transparence  $\alpha_l$  de l'onde est égale à  $1 - (\vec{V} \cdot \vec{v})$ . Cette évaluation de transparence permet à l'onde de graduellement s'effacer lorsque sa direction devient parallèle au vecteur caméra.

À cette évaluation première de transparence, nous ajoutons deux évaluations qui coupent les régions indésirables du contour.

L'onde de bruit doit rester discrète pour ne pas nuire à l'information qu'elle doit véhiculer. Pour diminuer son importance visuelle, nous coupons les contours près des articulations de chaque joint (voir figure 5.5(b)). Cette représentation tente aussi de rejoindre les illustrations traditionnelles des lignes d'action en bande dessinée [McC93]. Pour chaque point qui constitue le contour, nous évaluons sa distance perpendiculaire à l'axe longitudinal du joint. Celle-ci doit être inférieure à  $\beta\Delta y/2$ , où  $\beta \in [0, 1]$  et  $\Delta y$  correspond à la longueur de l'axe  $y$  de la boîte englobante de la géométrie. Si cette condition n'est pas respectée, nous donnons une transparence complète ( $\alpha_l = 0$ ) au point  $l$  du contour.

Finalement, nous modifions l'apparence de l'onde de bruit de façon à indiquer la direction du mouvement (voir figure 5.5(c)). Le mouvement peut soit être bidirectionnel

ou unidirectionnel. Dans le premier cas, les ondes sont laissées comme telles. Si le mouvement est unidirectionnel, alors l'onde doit être construite à l'arrière de la géométrie de façon à suivre le mouvement. Aussi, nous évaluons les portions du contour à conserver en évaluant le produit scalaire de la direction du mouvement  $\vec{v}$  avec la normale  $\vec{n}_l$  de chaque point du contour. Si le résultat est supérieur à zéro, la normale est dans le même sens que le mouvement. Dans ce cas, la transparence est complète pour le point  $l$  du contour.

Cette représentation donne de très bons résultats pour des géométries simples. Nous proposons aussi une représentation de l'onde de bruit par texture animée. Cette méthode construit d'abord un plan sur le groupement de joints à distance  $\gamma$  sur le chemin articulé. Ce plan est orienté perpendiculairement au vecteur de vue  $\vec{V}$ . Sur ce plan, nous dessinons de multiples anneaux dont le rayon augmente graduellement. Nous coupons les anneaux pour ne conserver que les portions orientées dans la direction du mouvement. Cette représentation possède certains avantages. La géométrie est d'une part très simple et elle est indépendante de la figure articulée. Aussi, les textures animées attirent beaucoup plus l'attention de l'utilisateur, ce qui en facilite la manipulation dans un système interactif. Quoi qu'il en soit, les contours du personnage sont beaucoup plus intuitifs pour l'utilisateur et ont donc été choisis comme représentation officielle des ondes de bruit.

### 5.3 Suivi stroboscopique

Le suivi stroboscopique consiste à reproduire les poses précédentes de l'animation afin de reconstituer l'action passée par échantillonnage discret de l'animation [ADA<sup>+</sup>04, Cut02, McC93]. On retrouve l'utilisation de cette technique dans les arts. L'effet peut entre autres être facilement reproduit en photographie. Cette technique d'illustration produit des indicateurs qui ne sont pas visuellement imposants et induisent une perception du mouvement presque innée chez l'être humain.

Il ne faut pas confondre le suivi stroboscopique avec le flou de mouvement. Les deux indicateurs s'apparentent, mais ne véhiculent pas le même niveau d'information. Pour reproduire le flou de mouvement dans une image, on procède habituellement par filtrage passe-bas des régions en mouvement suivi d'une fusion avec l'image originelle. Cette technique arrive à reproduire une notion de mouvement à faible distance de la

pose statique analysée. Le suivi stroboscopique génère un effet similaire si les poses antérieures sont près de la pose statique analysée [BE01]. Toutefois, cet indicateur génère des poses discrétisées lorsque le mouvement est plus rapide, ce qui en permet une meilleure évaluation.

Notre implémentation du suivi stroboscopique se sert de l'information temporelle de la séquence de capture de mouvements pour reproduire avec une transparence  $\alpha$  qui décroît exponentiellement les  $n_s$  poses précédentes à la pose statique courante. L'utilisateur peut spécifier une valeur de transparence initiale  $\alpha_0$  avec laquelle on calcule la transparence de chaque réplique (voir figure 5.6). Les répliques stroboscopiques peuvent être consécutives entre elles ou bien séparées par un nombre paramétrable de poses.

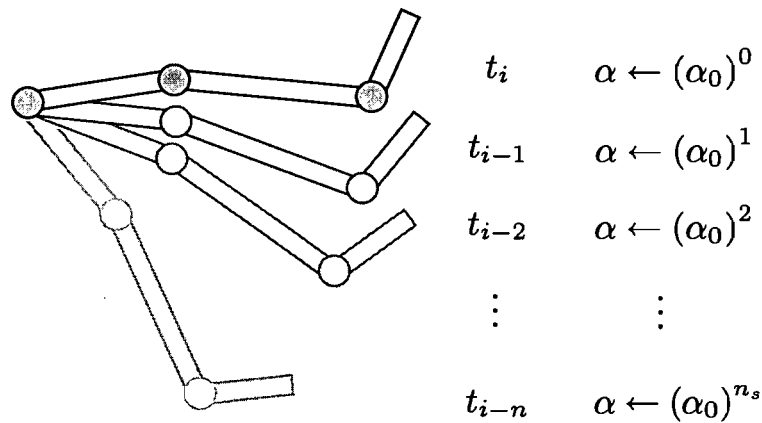


FIG. 5.6 – Paramètres de construction du suivi stroboscopique. La géométrie du personnage est répétée  $n_s$  fois avec une transparence incrémentale  $\alpha$ . L'utilisateur spécifie la transparence de base  $\alpha_0$ . La valeur de transparence pour chaque réplique stroboscopique au temps  $t_{i-j}$  est définie comme  $(\alpha_0)^j$ .

Cette méthode d'illustration est considérablement plus lourde à l'exécution que ne peuvent l'être les flèches de mouvement ou les ondes de bruit. En effet, ici, on reproduit la géométrie du personnage un certain nombre de fois et cela, à chaque affichage. Pour permettre un rendu plus rapide, on procède à quelques optimisations. En premier lieu, les répliques sont enregistrées dans une liste d'affichage. Cela permet une manipulation en temps réel du personnage une fois la pose statique isolée. Ensuite, pour permettre une animation le plus fluide possible lorsque l'indicateur y est ajouté, on entrepose les  $n_s$  listes d'affichage dans une liste chaînée. À chaque nouvelle pose de l'animation, on ajoute la pose précédente à la liste et on retire la  $(n_s + 1)^{\text{ème}}$  pose. Par ailleurs, on

applique aussi un critère d'arrêt qui se base sur la transparence de la réplique à afficher. Ainsi, on affiche la réplique si sa valeur de transparence  $\alpha$  est supérieure au seuil  $\alpha_{min}$ .

## 5.4 Extensions

Les indicateurs présentés aux sections 5.1, 5.2 et 5.3 permettent d'améliorer l'information temporelle que transmet une seule pose statique d'une séquence de capture de mouvements. Pour certaines animations, notamment les séquences où le personnage se déplace dans la scène (marches, courses), il est possible d'obtenir une représentation statique de l'animation complète. Nous présentons deux solutions possibles pour construire une telle représentation : l'illustration par poses multiples (section 5.4.1) et l'illustration par traces de pas (section 5.4.2).

### 5.4.1 Illustration par poses multiples

L'illustration de poses multiples consiste à reproduire les poses clés de l'animation dans une seule image [ACCO05]. Ces poses créent une suite temporelle logique qui laisse entrevoir l'action générale de l'animation complète. Or, il demeure ambigu de comprendre le mouvement avec seulement des poses statiques comme information. Par ailleurs, l'image offre un support limité à l'ajout possible de poses pour clarifier l'animation. Plus l'image contient de poses, plus celles-ci s'intersecteront entre elles, et plus l'image sera surchargée d'information.

Procéder à une illustration complète de chaque pose clé de la séquence par une combinaison de flèches de mouvement, d'ondes de bruit et de suivi stroboscopique surchargerait inutilement l'image. L'approche que nous adoptons ici est de remplacer l'information perdue entre deux poses clés par une simple flèche de mouvement (section 5.1). L'ajout d'un seul indicateur entre les poses ne surcharge pas l'image et aide à recomposer temporellement le déplacement et la vitesse tout au long de la séquence (voir figure 6.8).

Nous générons une segmentation automatique des poses clés de la séquence en isolant itérativement les poses dont le mouvement génère un écart non-négligeable face au reste de la séquence. Cette méthode de segmentation s'inspire fortement des travaux de Assa *et al.* [ACCO05]. Les détails de cette méthode sont expliqués au chapitre 3.

Considérons deux poses clés isolées dans la séquence de capture de mouvements. Entre ces deux poses, il est possible d'extraire toute l'information de mouvement en uti-



lisant les groupements hiérarchiques proposés à la section 4.4. Ici, nous utilisons le premier niveau ou deuxième niveau de la hiérarchie de façon à construire une représentation du mouvement plus générale.

De la pose virtuelle  $t_i$  qui se situe entre les poses clés  $t_{i-}$  et  $t_{i+}$ , nous construisons une courbe de mouvement avec laquelle nous procédons à l'analyse, puis la construction d'une flèche de mouvement de façon similaire à ce qui a été expliqué à la section 5.1 (voir figure 5.7).

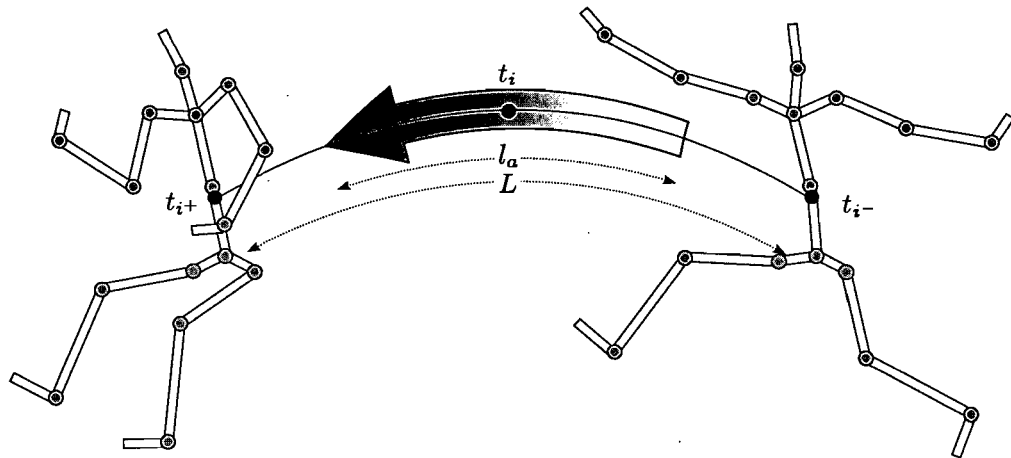


FIG. 5.7 – Isolation de la courbe de mouvement entre deux poses clés. La flèche de mouvement est le résultat d'une analyse similaire à celle proposée à la section 5.1. Nous modifions toutefois sa longueur  $l_a$  avec le paramètre  $\delta \in [0, 1]$  de sorte que  $l_a = \delta L$ .

Comme pour les poses individuelles, nous laissons à l'utilisateur la possibilité de changer les paramètres des flèches de mouvement. De plus, nous donnons la possibilité de changer la longueur de la flèche entre les poses clés  $t_{i-}$  et  $t_{i+}$ . Cette longueur est calculée proportionnellement à la longueur totale de la courbe de mouvement à l'aide du paramètre  $\delta \in [0, 1]$  que nous laissons au contrôle de l'utilisateur. Cette méthode a pour but de s'assurer que la flèche de mouvement soit centrée à la pose  $t_i$  et de longueur uniforme de part et d'autre de la pose virtuelle.

#### 5.4.2 Illustration par traces de pas

Une illustration des traces de pas permet de simplifier la séquence en n'affichant seulement que l'information reliée aux pieds du personnage en contact avec le sol tout au long l'animation. Il s'agit ici d'une représentation très minimale, mais qui est riche

d'information pour certains types d'animations où le personnage exécute des séquences de pas complexes, séquences qu'il est difficile d'illustrer avec précision avec un autre indicateur. Cette représentation est encore utilisée en notation pour la danse [Hut84]. Bien que d'autres notations comme la notation *Laban* (voir section 2.4), fournissent beaucoup plus d'information pratique pour les danseurs et chorégraphes, les traces de pas sont une représentation intuitive que n'importe qui peut comprendre sans étude préliminaire des symboles utilisés.

La segmentation des pas est un sujet de recherche d'actualité dans le milieu de la capture de mouvements. Les approximations dues à la compression du mouvement ou le bruit ajouté à une séquence de capture de mouvements passeront le plus souvent inaperçus, car perceptuellement, notre œil a l'habitude de reconnaître le mouvement humain, qu'il soit bruité ou simplifié. Toutefois, il en va tout autrement si cette modification du signal originel est ajouté aux pieds du personnage. En effet, ceci crée un phénomène appelé le "*foot skating*" et donne l'impression que les pieds du personnage glissent sur le sol. Pour contrer ce problème, les méthodes de correction proposent de segmenter le pas, puis de fixer sa position au sol durant la période de temps où le personnage a le pied posé au sol [KSG02, GBT06]. En utilisant l'information donnée par les groupements de joints qui représentent les pieds du personnage, nous procédons à une segmentation automatique des traces de pas du personnage. Nous raffinons les résultats manuellement si besoin est.

Pour un pas sélectionné, nous illustrons la géométrie de la trace de ce pas sur le sol avec une texture 2D que nous alignons le long de l'axe donné par le groupement de joints qui représente le pied au temps  $t_i$ . Nous différencions le pied gauche du pied droit par une couleur unique qui est appliquée à la représentation de chaque trace de pied (texture appliquée sur un rectangle).

Entre chaque trace de pas, il est possible d'ajouter de l'information sous forme de flèches de mouvement (voir section 5.1). La méthode de construction d'une flèche de mouvement pour cet indicateur est presque identique à celle présentée pour les poses multiples à la section 5.4.1. La seule différence réside dans sa construction pour laquelle il n'est pas nécessaire de procéder à des tests de robustesse, puisque la flèche est toujours parallèle au sol. Pour améliorer l'information temporelle de la séquence, nous ajoutons des nombres sur chaque trace de pas (voir figure 6.9(b)).

Les flèches de mouvement donneront de bons résultats pour les animations ou les pas sont rapprochés les uns des autres, mais deviennent nuisibles pour certaines animations complexes. Dans cette optique, il arrive fréquemment qu'une flèche de mouvement se retrouve superposée à une trace de pas qui intersecte sa courbe de mouvement (voir figure 5.8).

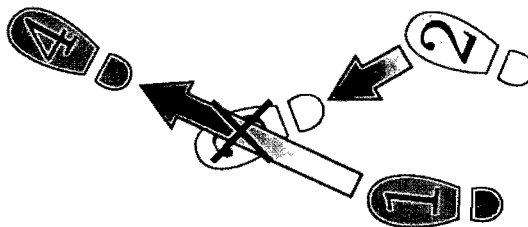


FIG. 5.8 – Exemple de superposition lors de l'illustration des traces de pas. Notre analyse traditionnelle par courbe de mouvement des flèches de mouvement ne donnera pas toujours de bons résultats pour les traces de pas qui présentent des mouvements plus complexes.

Pour résoudre ce problème d'affichage, il est essentiel d'apposer des flèches qui ne représentent pas les mouvements réels du personnage, mais servent plutôt à établir un lien logique entre les traces des pas. En enlevant cette contrainte, il est alors possible de modifier le chemin des flèches de mouvement et leur donner une apparence plus esthétique en substituant la courbe de mouvement réelle par une courbe paramétrique (*e.g.* Bézier). Dès lors, le problème à solutionner est celui d'une illustration de graphe où les noeuds sont des traces de pas et les arêtes, des flèches de mouvement. Plusieurs algorithmes adressent déjà ce problème. Ces algorithmes proposent une illustration automatique de larges graphes tout en minimisant les superpositions des arêtes et des noeuds entre eux [DMS05, AMA07]. Dans notre cas, il est nécessaire de figer la position des noeuds (*i.e.* traces de pas) et ainsi trouver une disposition des flèches de mouvement selon les contraintes choisies. Une approche interactive par manipulation des points de contrôle des courbes paramétriques peut aussi fournir des résultats satisfaisants, voire plus intéressants, si on considère le nombre de flèches de mouvement limité que génère une illustration par traces de pas.

## Chapitre 6

# Résultats

Dans les chapitres 4 et 5, nous avons présenté une méthode d'illustration non-photoréaliste de séquences de captures de mouvements. Cette méthode s'adapte interactivement à différents niveaux de détails de la hiérarchie de capture de mouvements squelettiques et permet d'améliorer l'information temporelle véhiculée par une seule pose de la séquence, ou d'un ensemble de poses discrétisées. Dans ce chapitre, nous présentons les résultats obtenus avec cette méthode pour l'illustration de poses uniques à la section 6.1 (figures 6.1 à 6.7) et de poses multiples à la section 6.2 (figures 6.8 et 6.9).

### 6.1 Poses individuelles

L'illustration de poses individuelles permet d'agencer les images dans des cellules séparées dans un format de "*comic strip*". Ainsi, en plus de l'information temporelle donnée par l'image elle-même, nous ajoutons une cohérence temporelle des poses individuelles entre elles [Eis85]. La disposition des cellules les unes par rapport, la dimension des images, leur répétition dans la bande [McC93] sont tous des moyens d'introduire encore plus d'information, mais nous nous en tenons à une distribution séquentielle simple pour l'instant.

La figure 6.1 illustre avec quatre images une séquence d'exercices. Le personnage fait des "*jumping-jacks*", des torsions au niveau du dos, pivote ses bras et touche ses pieds avec ses mains. Une seule image ne peut résumer un mouvement si complexe, mais les images multiples composent une meilleure reconstruction temporelle. Nous utilisons le niveau 3 des groupements hiérarchiques (voir figure 4.5) pour une illustration précise.

Les valeurs choisies par défaut donnent des résultats satisfaisants pour cette séquence, mais nous avons modifié manuellement certaines valeurs par la suite afin d'améliorer l'information véhiculée. En premier lieu, nous avons augmenté la valeur de  $\gamma$  jusqu'à 0.8 afin d'obtenir des flèches de mouvement plus circulaires situées près des mains plutôt que sur l'avant-bras. Aussi, pour la dernière image, nous avons éloigné les poses clés frontières  $t_{i-}$  et  $t_{i+}$  de façon à obtenir une courbe de mouvement plus grande, et ainsi de plus grandes flèches de mouvement.

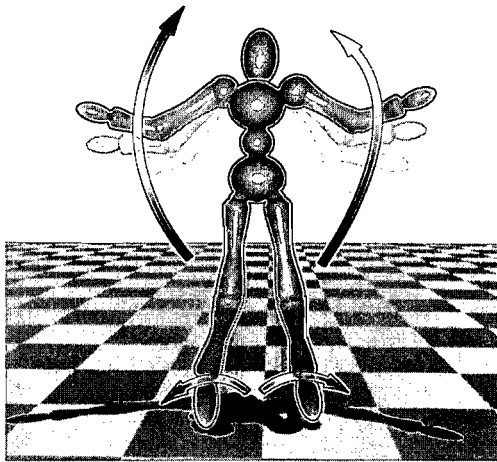
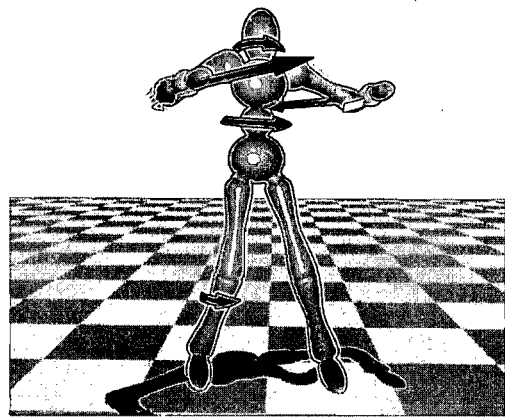
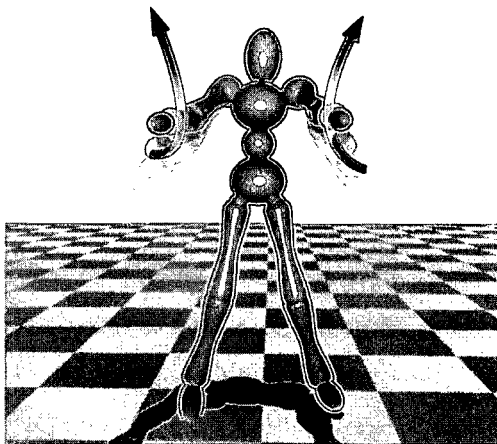
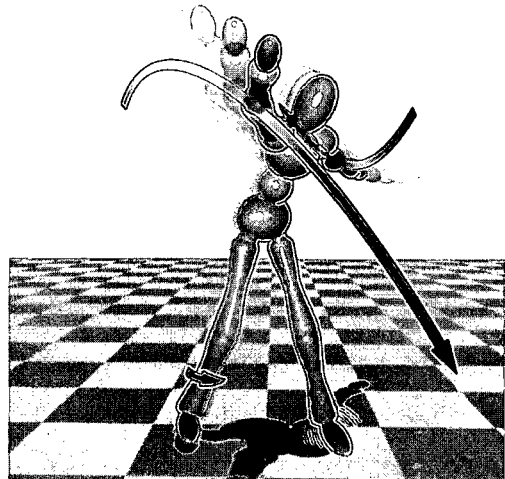
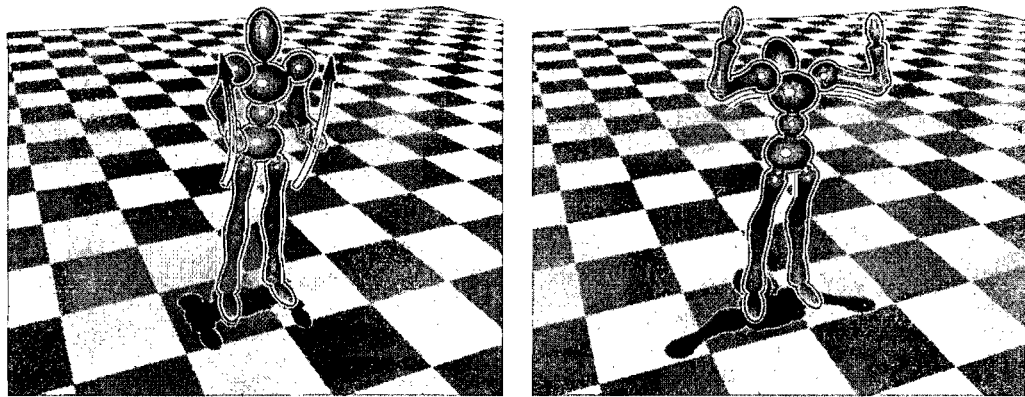
(a) *Jumping-jack*(b) *Torsion du dos*(c) *Rotation des bras*(d) *Étirement du bras vers le pied*

FIG. 6.1 – Une séquence d'exercices. Ces illustrations combinent flèches de mouvement, ondes de bruit et suivi stroboscopique.

Nous avons illustré la séquence d'haltérophilie présentée à la figure 6.2 à l'aide de

deux images. Le personnage soulève d'abord les poids puis les maintient dans les airs. Puisque le mouvement de la levée nécessite le concours des avant-bras, nous illustrons cette séquence avec le dernier niveau de la hiérarchie qui contient cette information. Ainsi, nous sommes en mesure d'extraire le mouvement des avant-bras par rapport aux coudes du personnage. De plus, nous augmentons encore la valeur de  $\gamma$  pour cette première image afin de positionner les flèches de mouvement près des mains et encore une fois accentuer leur courbure. Dans la deuxième image, le personnage exerce une force dirigée vers le haut pour maintenir les poids dans les airs, mais ne génère pas de mouvement qu'il est possible de voir à l'oeil nu. Nous ajoutons les ondes de bruit sous les bras du personnage pour amplifier ce mouvement autrement imperceptible. Pour cette image, les flèches de mouvement auraient été beaucoup trop courtes et n'auraient généré aucune information utile.



(a) Levée de poids

(b) Maintien dans les airs

FIG. 6.2 – Une séquence d'haltérophilie. Nous utilisons successivement les flèches de mouvement pour la première image et les ondes de bruit dans la deuxième image pour amplifier le mouvement.

La figure 6.3 illustre grâce à deux images un personnage qui frappe du pied un ballon de soccer. Nous illustrons d'abord l'élan du personnage, puis la frappe. Pour cette séquence, nous augmentons la valeur de  $\gamma$  jusqu'à 0.75 afin de positionner les flèches de mouvement sur les tibias du personnage. Par ailleurs, on peut remarquer sur ces deux images l'information véhiculée par le gradient de couleur ajouté aux flèches de mouvement. Ainsi, dans son élan, le personnage avance sa jambe gauche rapidement

vers l'avant avant de s'arrêter précipitamment. Par la suite, il avance la jambe droite d'abord lentement, puis accélère pour la frappe finale.

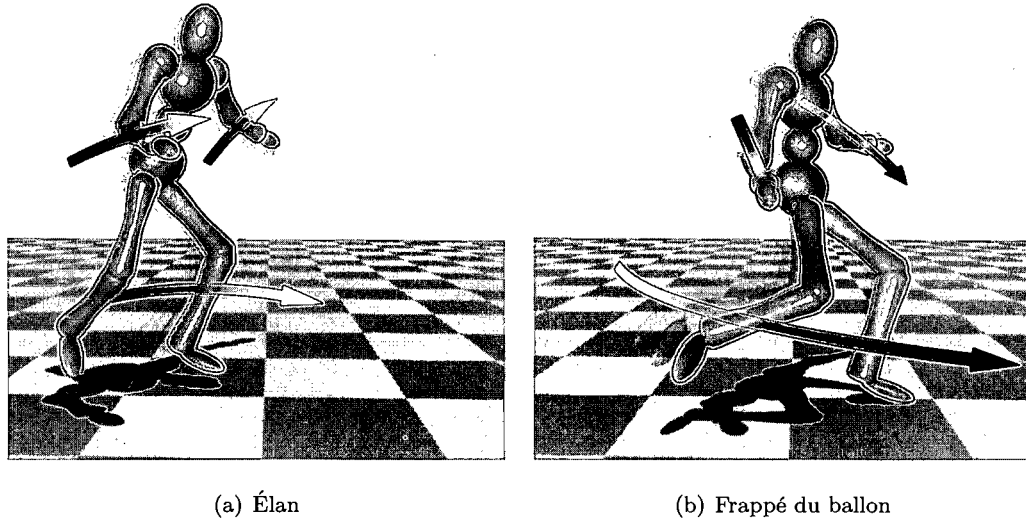
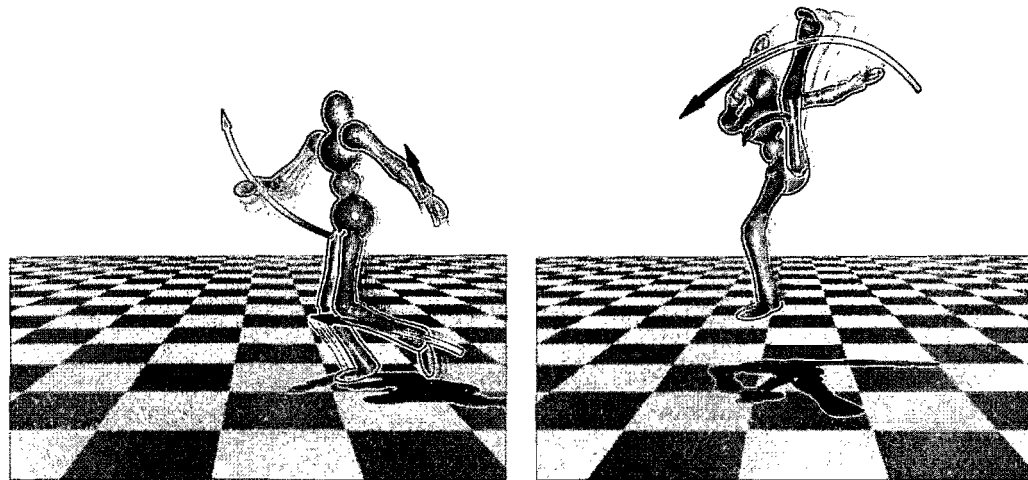


FIG. 6.3 – Une séquence de soccer. Une utilisation conjointe de flèches de mouvement et d'un léger suivi stroboscopique parvient à illustrer un tel mouvement.

La figure 6.4 illustre en trois images un personnage qui donne un coup de pied rotatif. Le personnage s'élançe, donne son coup de pied et atterrit sur le sol. Pour les trois images, nous modifions la valeur de  $\gamma$  de façon à augmenter la courbure générale des flèches de mouvement. Sur la deuxième image, on peut remarquer la présence d'une flèche de rotation autour du torse. Nous avons augmenté la valeur de l'angle  $\varphi$  de la flèche de rotation de façon à amplifier son importance dans l'illustration.

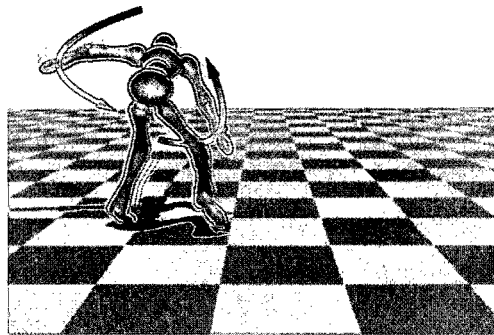
La figure 6.5 représente en trois images un personnage qui fait la roue. Le personnage s'élançe, fait la roue et revient sur ses pieds. Pour la deuxième image, nous augmentons la largeur des flèches de mouvement  $w_b$  jusqu'à 1.0 de façon à amplifier leur importance visuelle. De plus, nous augmentons l'espace  $\epsilon$  entre chaque onde de bruit de façon à les dégager un peu plus de la géométrie et des autres indicateurs de mouvements.

Nous avons illustré la séquence de lancer de ballon présentée à la figure 6.6 à l'aide de deux images. On voit donc le personnage prendre son élan, puis lancer le ballon. La première image illustre peu de mouvement, mais présente un personnage en balance dynamique [Cut02] qui donne immédiatement une idée de l'action réalisée. Nous améliorons l'information temporelle de cette image par l'ajout d'ondes de bruit. Dans la deuxième image, nous avons augmenté la valeur de  $\gamma$  de façon à positionner les flèches



(a) Élan

(b) Coup de pied



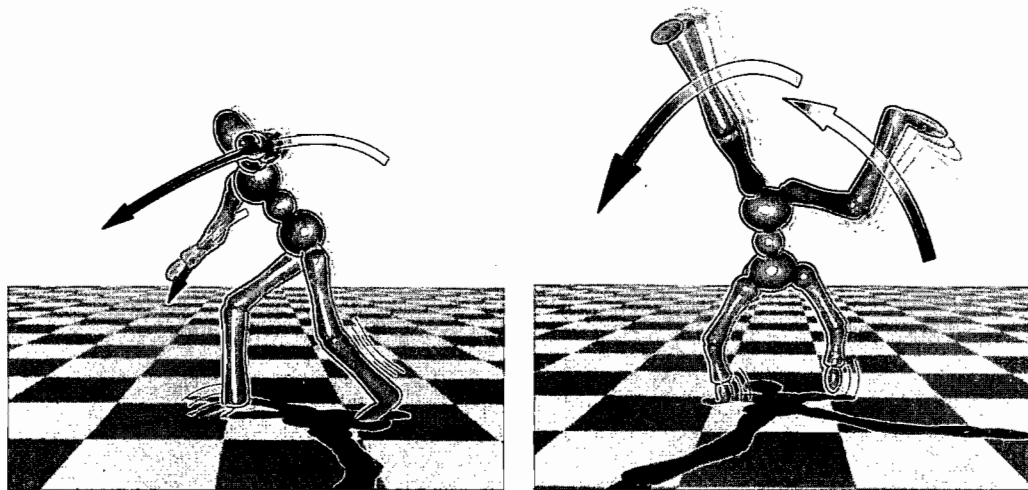
(c) Atterrissage

FIG. 6.4 – Une séquence de coup de pied rotatif. Nous appliquons les flèches de mouvement, le suivi stroboscopique et les ondes de bruit conjointement pour cette illustration.

de mouvement près des mains et augmenter leur courbure pour le lancer.

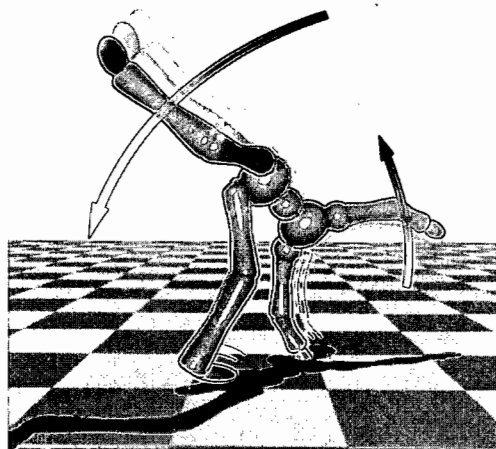
La figure 6.7 illustre un personnage qui se met en équilibre sur une jambe par le biais de deux images. L'illustration fournie par notre système nous convenait pour cette séquence, alors aucun paramètre n'a nécessité de modifications. On peut remarquer que les ondes de bruit viennent ajouter beaucoup d'information à cette action. Le personnage se met d'abord en position. Nous ajoutons une flèche sur sa jambe droite qui s'élève du sol et des ondes de bruit sur ses bras qui bougent faiblement pour l'aider à maintenir son équilibre. Dans la deuxième image, le personnage lutte pour conserver son équilibre.





(a) Élan

(b) Roue



(c) Atterrissage

FIG. 6.5 – Une séquence de roue. Nous incorporons les flèches de mouvement, les ondes de bruit et le suivi stroboscopique à cette illustration.

Les ondes de bruit ajoutées à ses mains ainsi qu'à son pied droit amplifient les mouvements imperceptibles qu'il exécute pour ne pas tomber. Encore une fois, les flèches de mouvement n'auraient été d'aucune utilité dans une telle situation.

Les valeurs des paramètres d'illustration utilisés pour les figures 6.1 à 6.7 sont disponibles dans le tableau 6.1.

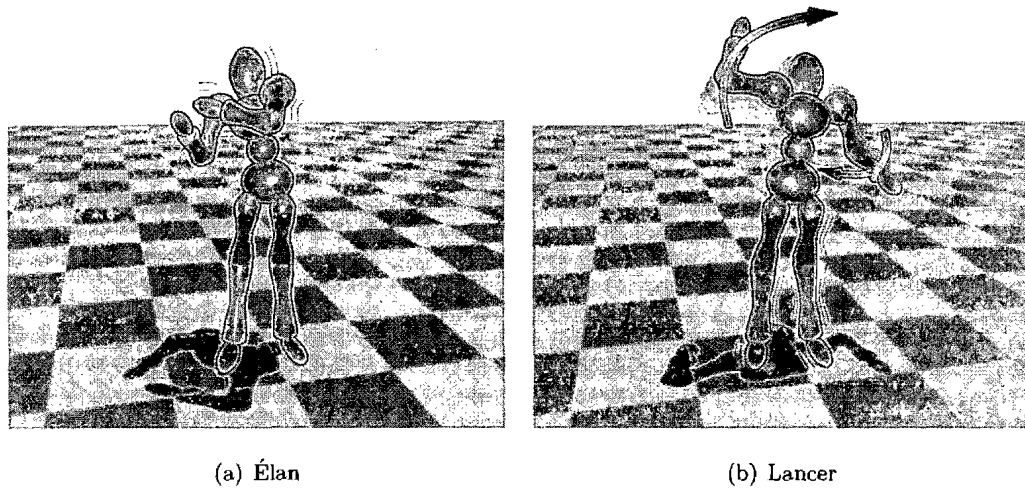


FIG. 6.6 – Une séquence de lancer de ballon. Nous illustrons cette séquence avec des ondes de bruit dans la première image et des flèches de mouvement dans la deuxième.

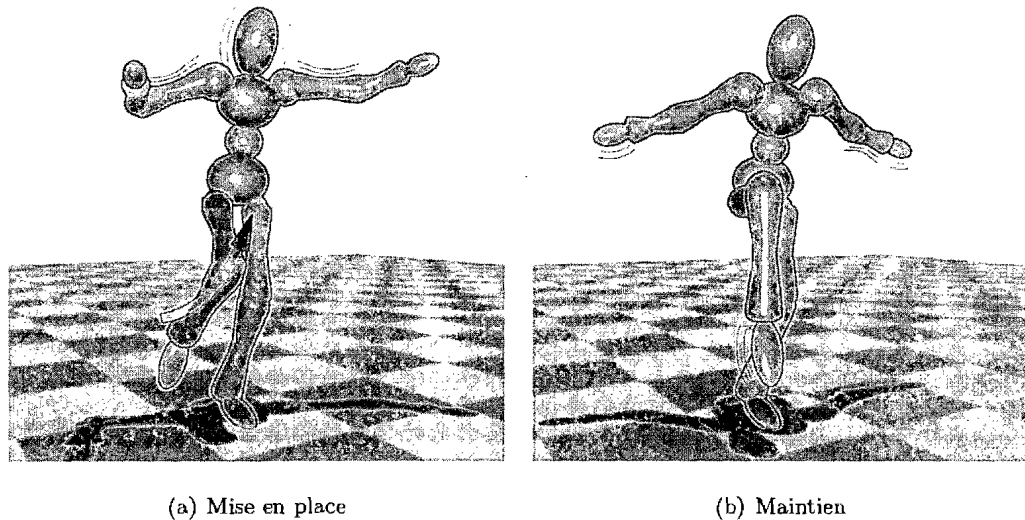


FIG. 6.7 – Un personnage se tient en équilibre sur un pied. Nous améliorons l'information véhiculée par cette séquence principalement à l'aide d'ondes de bruit.

## 6.2 Poses multiples

L'illustration de poses multiples donne une vue d'ensemble de la séquence grâce à une seule image. Pour certaines animations, il peut être intéressant de jumeler les illustrations de poses multiples avec des illustrations individuelles et ainsi ajouter de

Figure	Paramètres						
	Flèches			Ondes		Strob.	
	$\gamma$	$w_b$	$\varphi$	$n_w$	$\epsilon$	$n_s$	$\alpha_0$
<b>Par défaut</b>	0.50	0.50	140°	2	0.45	5	0.50
6.1(a)	0.80	0.50	140°	–	–	4	0.40
6.1(b)	0.50	0.50	140°	–	–	4	0.40
6.1(c)	0.50	0.50	140°	–	–	4	0.40
6.1(d)	0.50	0.50	140°	–	–	4	0.40
6.2(a)	0.80	0.50	–	–	–	–	–
6.2(b)	0.50	–	–	2	0.45	–	–
6.3(a)	0.55	0.75	–	–	–	3	0.45
6.3(b)	0.55	0.75	–	–	–	3	0.45
6.4(a)	0.75	0.60	–	2	0.40	9	0.55
6.4(b)	0.75	0.60	160°	–	–	5	0.50
6.4(c)	0.75	0.60	–	2	0.65	5	0.50
6.5(a)	0.60	0.60	–	2	0.75	10	0.50
6.5(b)	0.60	1.00	–	2	0.75	10	0.50
6.5(c)	0.60	0.60	–	2	0.75	10	0.50
6.6(a)	0.50	–	–	2	0.55	–	–
6.6(b)	0.70	0.60	–	2	0.45	4	0.55
6.7(a)	0.50	0.60	–	2	0.45	–	–
6.7(b)	0.50	–	–	2	0.45	–	–

TAB. 6.1 – Paramètres utilisés pour les images. Bien que les paramètres laissés par défaut à l'algorithme d'affichage donnent des résultats satisfaisants, le système d'ajustement interactif est en temps réel et permet de modifier l'apparence des indicateurs rapidement.

l'information supplémentaire à la séquence.

La figure 6.8 représente une séquence de marche où le personnage évite des obstacles, invisibles dans la scène. Il est possible de simplifier cette animation par huit poses successives isolées automatiquement. Nous avons ajouté des flèches de mouvement entre les poses. Notre algorithme a automatiquement rejeté la flèche entre les deux premières poses ainsi que celle entre les deux dernières poses, car elles n'étaient pas suffisamment grandes. Par ailleurs, nous avons ajusté la longueur des flèches à la moitié de la distance parcourue entre deux poses. De plus, nous avons augmenté la largeur de celles-ci pour amplifier leur importance visuelle.

Nous représentons un personnage qui exécute une danse de lambada avec une illustration par traces de pas à la figure 6.9. Le personnage exécute une chorégraphie de six pas qui se répètent par la suite tout au long de l'animation. À cette représentation, nous avons ajouté des flèches de mouvement que nous avons rapetissées jusqu'au quart de la

distance entre deux traces de façon à ce que les flèches ne couvrent pas la géométrie. Aussi, nous avons diminué la largeur des flèches pour accommoder la chorégraphie qui n'est pas spatialement étendue.

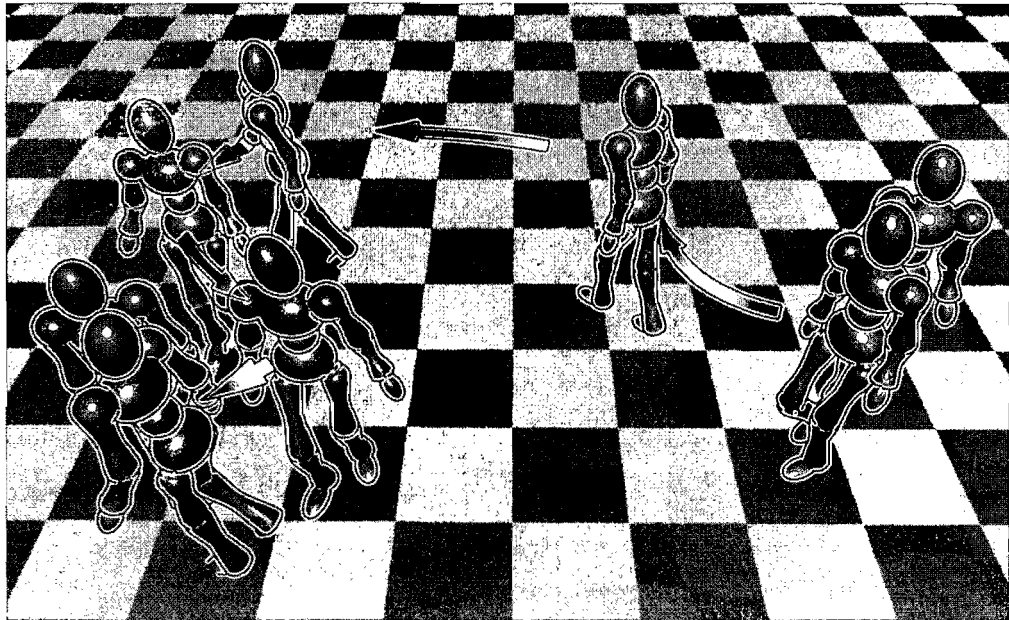
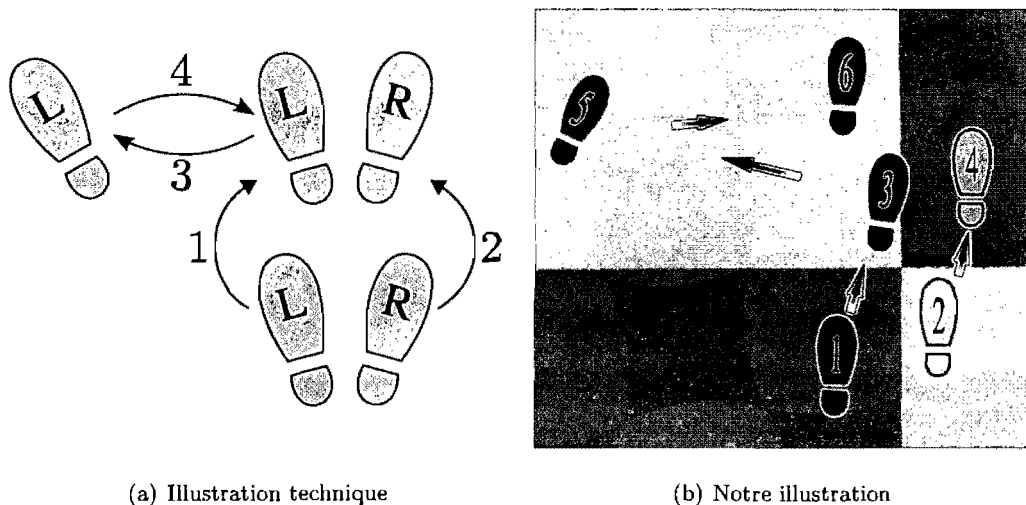


FIG. 6.8 – Une séquence de marche illustrée par huit poses clés.



(a) Illustration technique

(b) Notre illustration

FIG. 6.9 – Une séquence de danse de lambada illustrée par traces de pas.

Les résultats présentés aux figures 6.1 à 6.9 ont tous nécessité quelques modifications purement esthétiques. Ces modifications demandent peu de temps à l'utilisateur et permettent de faire des améliorations rapides sur les indicateurs de mouvements. Un

vidéo explicatif présenté conjointement avec l'article "*Motion Cues for Illustration of Skeletal Motion Capture Data*" [BZOP07] est disponible sur le site web du laboratoire à l'adresse [www.iro.umontreal.ca/labs/infographie/papers](http://www.iro.umontreal.ca/labs/infographie/papers). Cette vidéo illustre les séquences de captures de mouvements qui ont été utilisées et les résultats que notre technique a permis d'obtenir. De plus, la vidéo présente l'aspect interactif de notre application qui permet à l'utilisateur de modifier les paramètres des indicateurs et d'obtenir un résultat en temps réel.

Alors que nous présentons dans ce mémoire des résultats purement statiques, il est possible d'utiliser les indicateurs de mouvements en temps réel dans une animation. Visualiser l'animation avec superposition des indicateurs permet à l'utilisateur de mieux comprendre le mouvement. Par ailleurs, il est plus facile de cibler les poses intéressantes rapidement en analysant l'animation. L'utilisateur peut changer le point de vue pendant l'animation et décider de la meilleure représentation à adopter pour l'image statique.

# Chapitre 7

## Conclusion

*To understand is to know what cause provokes what effect, by what means, at what rate.*

Edward Tufte, *Visual Explanations*

L'image possède un pouvoir d'illustration formidable. Par l'ajout de quelques indicateurs visuels précis, l'artiste peut changer le sens de l'image et modifier la perception qu'en aura une tierce personne. Toutefois, cet outil est à double tranchant, car si l'indicateur visuel améliore l'information véhiculée par l'image, il peut aussi induire la personne en erreur. Les recherches récentes en informatique graphique tiennent compte de cette limite de la perception humaine sur l'image 2D et suggèrent des algorithmes de génération d'indices visuels adaptés au médium restreint.

### 7.1 Sommaire

Dans ce mémoire, nous avons présenté des méthodes d'illustration d'indicateurs de mouvements non-photoréalistes pour améliorer l'information temporelle de poses statiques obtenues de séquences de captures de mouvements squelettiques.

Pour adapter les indicateurs de mouvements aux figures articulées hiérarchiques utilisées dans les données de captures de mouvements, nous avons défini des groupements hiérarchiques qui isolent, selon le niveau de détail choisi, les régions d'intérêt sur le squelette. Puisque les échantillons utilisés pour ce projet proviennent tous de captures d'êtres humains, nous avons manuellement construit les groupements hiérarchiques utilisés pour ce type de squelette.

En utilisant les groupements hiérarchiques, nous avons proposé des méthodes d'analyse et d'illustration d'indicateurs de mouvements. Nous avons suggéré l'utilisation de trois indicateurs de mouvements qui améliorent l'information temporelle globale de la pose statique lorsqu'ils sont combinés. La flèche de mouvement donne le meilleur aperçu du mouvement. Sa forme permet de récupérer la trajectoire ainsi que la direction. Le gradient de couleur sur sa surface indique la vitesse et permet à l'utilisateur de déduire l'accélération sur la longueur du mouvement. Toutefois, la flèche illustre mal les gestes subtils, et c'est pourquoi les ondes de bruit viennent compenser cette limite. L'onde de bruit donne une vague idée de la direction du mouvement unidirectionnel ou bidirectionnel. Enfin, nous avons aussi suggéré l'emploi du suivi stroboscopique pour renforcer l'information temporelle si besoin est. Le suivi stroboscopique donne une idée de la trajectoire et la direction du mouvement par répétition des poses antérieures. Les indicateurs de mouvements s'adaptent au point de vue de la caméra pour permettre un affichage optimal en tout temps. Finalement, nous avons proposé deux extensions qui utilisent des poses multiples de la séquence. Un affichage par poses clés stroboscopiques permet d'afficher la séquence complète dans une image, alors qu'un affichage par traces de pas permet de récupérer les mouvements des pieds du personnage.

Les contributions de ce projet sont nombreuses. Tout d'abord, en proposant un système de groupements hiérarchiques, nous simplifions les données temporelles de la capture de mouvements et permettons une illustration sur différents niveaux de détails. Perceptuellement, cette hiérarchie est une abstraction de ce que fait déjà le cerveau dans son analyse des corps articulés. Par ailleurs, nous avons implanté un système d'analyse et d'illustration d'indicateurs de mouvements qui fonctionne en temps réel, sans prétraitement des captures de mouvements. Nous avons suggéré l'utilisation de trois indicateurs de mouvements qui permettent une illustration précise du mouvement. Les indicateurs ajustent leur géométrie par rapport au point de vue de la caméra pour assurer la robustesse de l'information en tout temps. Finalement, nous avons laissé au contrôle de l'utilisateur un certain nombre de paramètres d'illustration des indicateurs de mouvements. Ceci permet d'ajuster rapidement l'apparence des indicateurs pour atteindre un résultat final satisfaisant.

Ce travail a permis la publication d'un article intitulé "*Motion Cues for Illustration of Skeletal Motion Capture Data*" [BZOP07] qui fait état des méthodes expliquées plus

longuement dans ce mémoire.

## 7.2 Perspectives futures

Les résultats de ce projet sont satisfaisants, mais entraînent tout de même de nombreux travaux futurs potentiels. Certains ajouts sont possibles sans modification au système originel, alors que d'autres peuvent nécessiter une toute autre approche et donc l'exploration de nouvelles recherches qui n'ont pas été intégrées dans ce mémoire.

En premier lieu, les techniques d'illustration proposées pour communiquer l'information temporelle de la séquence de capture de mouvements nous permettent d'obtenir des résultats visuellement satisfaisants pour les mouvements continus du personnage (représentés par les flèches), mais souffrent d'inexactitude plus le mouvement est complexe. En effet, puisque nous estimons le mouvement par une courbe quadratique, nous devons omettre volontairement des informations qui peuvent être nécessaires dans certains cas. Alors que nous soutenons l'intérêt de la courbe quadratique pour l'illustration du mouvement continu, il peut être intéressant de laisser l'utilisateur décider de l'interpolation à effectuer sur les données temporelles.

Par ailleurs, en simplifiant les données temporelles d'un groupement de joints par une seule courbe de mouvement, nous ne prenons pas en compte les mouvements internes de ce groupement. De la même façon, nous identifions les rotations du groupement par son axe situé à la racine du joint. Cette méthode représente adéquatement les rotations du groupe de joints si nous faisons l'hypothèse que celui-ci est rigide. Or, encore une fois, il est impossible de représenter adéquatement les rotations internes au groupement à moins de procéder à l'illustration sur un niveau supérieur des groupements hiérarchiques. Aussi, en automatisant la sélection du niveau d'illustration pour chaque région de la figure articulée, il serait possible de choisir adaptativement les groupements hiérarchiques qui présentent des comportements rigides, et ainsi améliorer la fiabilité des informations véhiculées.

Les indicateurs de mouvements que nous avons proposés pour ce projet cernent la grande majorité des mouvements que l'on retrouve dans les séquences de captures de mouvements. À ceux-ci, nous aimerions ajouter des indicateurs dont la nature est plus artistique. Dans cette catégorie, les lignes de vitesse [CRH05] et le flou de mouvement [BE01] peuvent facilement s'adapter aux groupements hiérarchiques et donc nécessitent



peu de modifications au système originel.

Nous aimerions aussi revoir les paramètres d'analyse qui décident de la création des indicateurs de mouvements. Certains mouvements, comme les gestes répétés, ne sont pas pris en compte par les outils d'analyse actuels. Une fois isolés, ces mouvements peuvent être illustrés par les indicateurs de mouvements appropriés (*e.g.* flèche de mouvement bidirectionnelle) sans modification supplémentaire au système d'analyse.

Par ailleurs, nous aimerions soumettre notre système à une évaluation par des personnes externes au projet. Il est important de savoir si les paramètres laissés au contrôle de l'utilisateur sont compris par celui-ci, s'il voit leur utilité, et s'il atteint les résultats qu'il souhaite avoir avec ceux-ci.

À long terme, nous souhaiterions intégrer les recherches récentes en détection de mouvements [BSP<sup>+</sup>04, KG04, BvdPP07]. Une fois le geste isolé et identifié, il est alors trivial de l'associer à l'indicateur de mouvements qui le représente le mieux. Un tel système d'association requiert une base de données extensive des mouvements réalisables par l'être humain (et pour chaque type de capture de mouvements).

Avec ce système d'association, nous aimerions mettre sur pied une application d'apprentissage. En utilisant les données gestuelles d'un acteur, ce système pourrait aisément les comparer aux mouvements de la base de données, l'illustrer avec l'indicateur approprié, et indiquer à la personne les différences entre le mouvement attendu et celui réalisé. De nouveaux indicateurs de mouvements pourraient alors être conçus pour spécifiquement indiquer à l'élève les modifications à apporter pour corriger ses mouvements.

## Annexe A

# Terminologie

capture de mouvements : *motion capture, mocap*

figure articulée : *articulated figure*

flèche de mouvement : *motion arrow*

flou de mouvement : *motion blur*

graphe de scène : *scene graph*

indicateur visuel : *visual cue*

indicateur de mouvement : *motion cue*

ligne de strie : *streak line*

ligne de vitesse : *speed line, action line*

ligne fantôme : *ghost line*

onde de bruit : *noise wave*

ruban de vitesse : *zip ribbon*

scénarimage : *storyboard*

suivi stroboscopique : *stroboscopic motion*

# Bibliographie

- [ACCO05] Assa, J., Caspi, Y., et Cohen-Or, D. « Action synopsis : pose selection and illustration ». *ACM Trans. Graph. (Proc. SIGGRAPH '05)*, volume 24, numéro 3, pages 667–676, 2005.
- [ADA<sup>+</sup>04] Agarwala, A., Dontcheva, M., Agrawala, M., Drucker, S., Colburn, A., Curreless, B., Salesin, D., et Cohen, M. « Interactive digital photomontage ». *ACM Trans. Graph. (Proc. SIGGRAPH '04)*, volume 23, numéro 3, pages 294–302, 2004.
- [AMA07] Archambault, D., Munzner, T., et Auber, D. « TopoLayout : Multi-Level Graph Layout by Topological Features ». *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, volume 13, numéro 2, pages 305–317, mars 2007.
- [APH<sup>+</sup>03] Agrawala, M., Phan, D., Heiser, J., Haymaker, J., Klingner, J., Hanrahan, P., et Tversky, B. « Designing effective step-by-step assembly instructions ». *ACM Trans. Graph. (Proc. SIGGRAPH '03)*, volume 22, numéro 3, pages 828–837, 2003.
- [BE01] Brostow, G. J., et Essa, I. « Image-based motion blur for stop motion animation ». Dans *Proc. SIGGRAPH '01*, pages 561–566, 2001.
- [BH00] Brand, M., et Hertzmann, A. « Style machines ». Dans *Proc. SIGGRAPH '00*, pages 183–192, 2000.
- [BLCD02] Bregler, C., Loeb, L., Chuang, E., et Deshpande, H. « Turning to the masters : motion capturing cartoons ». *ACM Trans. Graph. (Proc. SIGGRAPH '02)*, volume 21, numéro 3, pages 399–407, 2002.

- [BSP<sup>+</sup>04] Barbic, J., Safonova, A., Pan, J.-Y., Faloutsos, C., Hodgins, J. K., et Pollard, N. S. « Segmenting motion capture data into distinct behaviors ». Dans *Proc. Graphics Interface*, pages 185–194, 2004.
- [BvdPP07] Beaudoin, P., van de Panne, M., et Poulin, P. « Automatic Construction of Compact Motion Graphs ». Rapport technique 1296, Université de Montréal, 2007.
- [BZOP07] Bouvier-Zappa, S., Ostromoukhov, V., et Poulin, P. « Motion Cues for Illustration of Skeletal Motion Capture Data ». Dans *Proc. Non-Photorealistic Animation and Rendering '07*, pages 133–140, août 2007.
- [CH05] Collomosse, J. P., et Hall, P. M. « Motion Analysis in Video : Dolls, Dynamic Cues and Modern Art ». Dans *Proc. International Conference on Vision, Video and Graphics*, pages 109–116, 2005.
- [Col04] Collomosse, J. P. *Higher Level Techniques for the Artistic Rendering of Images and Video*. Thèse de doctorat, University of Bath, United Kingdom, 2004.
- [CPIS02] Cheney, S., Pingel, M., Iverson, R., et Szymanski, M. « Simulating cartoon style animation ». Dans *Proc. Symposium on Non-photorealistic Animation and Rendering*, pages 133–138, 2002.
- [CRH05] Collomosse, J., Rowntree, D., et Hall, P. M. « Rendering cartoon-style motion cues in post-production video ». *Graphical Models*, volume 67, numéro 6, pages 549–564, 2005.
- [Cut02] Cutting, J. E. « Representing motion in a static image : constraints and parallels in art, science, and popular culture ». *Perception*, volume 31, numéro 10, pages 1165–1193, 2002.
- [DMR04] Dony, R., Mateer, J., et Robinson, J. « Automated Reverse Storyboarding ». Dans *Proc. 1st European Conference on Visual Media Production*, pages 193–202, mars 2004.
- [DMR05] Dony, R., Mateer, J., et Robinson, J. « Techniques for automated reverse storyboarding ». *IEEE Journal of Vision, Image & Signal Processing*, volume 152, numéro 4, pages 425–436, 2005.
- [DMS05] Dwyer, T., Marriott, K., et Stuckey, P. J. « Fast Node Overlap Removal ». Dans *Graph Drawing*, pages 153–164, 2005.

- [Eis85] Eisner, W. *Comics And Sequential Art*. Poorhouse Press, 1985.
- [GBT06] Glardon, P., Boulic, R., et Thalmann, D. « Robust on-line adaptive foot-plant detection and enforcement for locomotion ». *Visual Computer*, volume 22, numéro 3, pages 194–209, 2006.
- [GCSS06] Goldman, D. B., Curless, B., Salesin, D., et Seitz, S. M. « Schematic Storyboarding for Video Visualization and Editing ». *ACM Trans. Graph. (Proc SIGGRAPH '06)*, volume 25, numéro 3, pages 862–871, 2006.
- [GMS<sup>+</sup>80] Giesecke, F. E., Mitchell, A., Spencer, H. C., Hill, I. L., et Dygdon, J. T. *Technical Drawing, Seventh Edition*. Macmillan Publishing Co., 1980.
- [Har99] Hart, J. *The Art of the Storyboard : storyboarding for film, TV and animation*. Focal Press, 1999.
- [HHD04] Haller, M., Hanl, C., et Diephuis, J. « Non-photorealistic rendering techniques for motion in computer games ». *ACM Computers in Entertainment*, volume 2, numéro 4, pages 11–24, 2004.
- [HL94] Hsu, S. C., et Lee, I. H. H. « Drawing and animation using skeletal strokes ». Dans *Proc. SIGGRAPH '94*, pages 109–118, 1994.
- [HPA<sup>+</sup>04] Heiser, J., Phan, D., Agrawala, M., Tversky, B., et Hanrahan, P. « Identification and validation of cognitive design principles for automated generation of assembly instructions ». Dans *Proc. Working Conference on Advanced Visual Interfaces*, pages 311–319, 2004.
- [Hut84] Hutchinson, A. *Dance Notation : the process of recording movement on paper*. Dance Horizons, 1984.
- [Jen68] Jensen, C. H. *Engineering Drawing and Design*. McGraw-Hill, 1968.
- [JR05] Joshi, A., et Rheingans, P. « Illustration-inspired techniques for visualizing time-varying data ». Dans *Proc. IEEE Visualization '05*, pages 679–686, 2005.
- [KG04] Kovar, L., et Gleicher, M. « Automated extraction and parameterization of motions in large data sets ». *ACM Trans. Graph. (Proc. SIGGRAPH '04)*, volume 23, numéro 3, pages 559–568, 2004.
- [KGP02] Kovar, L., Gleicher, M., et Pighin, F. « Motion graphs ». *ACM Trans. Graph. (Proc. SIGGRAPH '02)*, volume 21, numéro 3, pages 473–482, 2002.

- [KHK03] Kawagishi, Y., Hatsuyama, K., et Kondo, K. « Cartoon Blur : Non-Photorealistic Motion Blur ». Dans *Proc. Computer Graphics International '03*, pages 276–281, 2003.
- [KSG02] Kovar, L., Schreiner, J., et Gleicher, M. « Footskate cleanup for motion capture editing ». Dans *Proc. Symposium on Computer Animation*, pages 97–104, 2002.
- [Lab74] Laban, R. *The Language of Movement : A guidebook to choreutics*. Plays, inc., 1974.
- [Lan00] Lander, J. « Under the Shade of the Rendering Tree ». *Game Developer Magazine*, volume 7, numéro 2, pages 17–21, février 2000.
- [LMHB00] Lake, A., Marshall, C., Harris, M., et Blackstein, M. « Stylized rendering techniques for scalable real-time 3D animation ». Dans *Proc. Symposium on Non-photorealistic Animation and Rendering*, pages 13–20, 2000.
- [LTF<sup>+</sup>05] Liu, C., Torralba, A., Freeman, W. T., Durand, F., et Adelson, E. H. « Motion magnification ». *ACM Trans. Graph. (Proc. SIGGRAPH '05)*, volume 24, numéro 3, pages 519–526, 2005.
- [McC93] McCloud, S. *Understanding Comics-The Invisible Art*. Kitchen Sink Press, 1993.
- [McC06] McCloud, S. *Making Comics : Storytelling Secrets of Comics, Manga and Graphic Novels*. Harpercollins, 2006.
- [MSS99] Masuch, M., Schlechtweg, S., et Schulz, R. « Speedlines : depicting motion in motionless pictures ». Dans *ACM SIGGRAPH '99 Conference abstracts and applications*, page 277, New York, NY, USA, 1999. ACM Press.
- [MTT06] Moriya, T., Takahashi, T., et Tanaka, A. « Non-photorealistic rendering technique for depicting 3D objects motion ». Dans *ACM SIGGRAPH '06 Research Posters*, page 114, 2006.
- [ND03] Nienhaus, M., et Döllner, J. « Dynamic Glyphs – Depicting Dynamics in Images of 3D Scenes ». Dans *Proc. Symposium on Smart Graphics '03*, pages 102–111, 2003.

- [ND05] Nienhaus, M., et Döllner, J. « Depicting Dynamics Using Principles of Visual Art and Narrations ». *IEEE Computer Graphics and Applications*, volume 25, numéro 3, pages 40–51, 2005.
- [OKKW05] Obayashi, S., Kondo, K., Konma, T., et Wamoto, K.-I. « Non-Photorealistic Motion Blur for 3D Animation ». Dans *ACM SIGGRAPH '05 Conference Abstracts*, 2005.
- [Pal99] Palmer, S. E. *Vision Science : Photons to Phenomenology*. Massachusetts Institute of Technology, 1999.
- [RZW02] Raskar, R., Ziegler, R., et Willwacher, T. « Cartoon dioramas in motion ». Dans *Proc. Symposium on Non-photorealistic Animation and Rendering*, pages 7–12, 2002.
- [Stu94] Sturman, D. J. « A Brief History of Motion Capture for Computer Character Animation ». Dans *Proc. SIGGRAPH '94 : Course Notes*, 1994.
- [TBvdP04] Thorne, M., Burke, D., et van de Panne, M. « Motion doodles : an interface for sketching character motion ». *ACM Trans. Graph. (Proc. SIGGRAPH '04)*, volume 23, numéro 3, pages 424–431, 2004.
- [Tuf97] Tufte, E. R. *Visual Explanations : Images and Quantities, Evidence and Narrative*. Graphics Press, 7 édition, 1997.
- [WDAC06] Wang, J., Drucker, S. M., Agrawala, M., et Cohen, M. F. « The cartoon animation filter ». *ACM Trans. Graph. (Proc. SIGGRAPH '06)*, volume 25, numéro 3, pages 1169–1173, 2006.
- [Wil01] Williams, R. *The Animator's Survival Kit*. Faber and Faber Limited, 2001.
- [WTH06] Wheeler, A., Thiel, J., et Hart, G. « Cartoon motion blur for 3D animation ». Dans *ACM SIGGRAPH '06 Sketches*, page 95, 2006.