



**HAL**  
open science

# Analyse du geste dansé et retours visuels par modèles physiques : apport des qualités de mouvement à l'interaction avec le corps entier

Sarah Fdili Alaoui

► **To cite this version:**

Sarah Fdili Alaoui. Analyse du geste dansé et retours visuels par modèles physiques : apport des qualités de mouvement à l'interaction avec le corps entier. Autre [cs.OH]. Université Paris Sud - Paris XI, 2012. Français. NNT : 2012PA112399 . tel-00805519

**HAL Id: tel-00805519**

**<https://theses.hal.science/tel-00805519>**

Submitted on 28 Mar 2013

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

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



UNIVERSITÉ PARIS-SUD

ÉCOLE DOCTORALE : EDIPS

Laboratoire d'Informatique pour la Mécanique et les Sciences de l'Ingénieur  
Institut de Recherche et Coordination Acoustique/Musique

**DISCIPLINE : Informatique**

**THÈSE DE DOCTORAT**

soutenue le 19/12/2012

par

**Sarah FDILI ALAOU**

**ANALYSE DU GESTE DANSÉ ET RETOURS  
VISUELS PAR MODÈLES PHYSIQUES:  
APPORT DES QUALITÉS DE MOUVEMENT À  
L'INTERACTION**

**Directeur de thèse :** Christian JACQUEMIN Professeur (Université Paris-Sud)  
**Co-directeur de thèse :** Frédéric BEVILACQUA Chargé de recherche (Ircam)

**Composition du jury :**

**Président du jury :** Michel BEAUDOUIN-LAFON Professeur (Université Paris-Sud)  
**Rapporteuses :** Catherine PELACHAUD DR CNRS (TELECOM Paris Tech)  
Sylvie GIBET Professeure (Université de Bretagne Sud)  
**Examineur :** Nuno CORREIA Professeur (Université nouvelle de Lisbonne)



# Résumé

La présente thèse a pour but d’approfondir l’étude du geste dans le cadre de l’interaction Homme Machine. Il s’agit de créer de nouveaux paradigmes d’interaction qui offrent à l’utilisateur de plus amples possibilités d’expression basées sur le geste. Un des vecteurs d’expression du geste, très rarement traité en Interaction Homme Machine, qui lui confère sa coloration et son aspect, est ce que les théoriciens et praticiens de la danse appellent « les qualités de mouvement ». Nous mettons à profit des collaborations avec le domaine de la danse pour étudier la notion de qualités de mouvement et l’intégrer à des paradigmes d’interaction gestuelle. Notre travail analyse les apports de l’intégration des qualités de mouvement comme modalité d’interaction, fournit les outils propices à l’élaboration de cette intégration (en termes de méthodes d’analyse, de visualisation et de contrôle gestuel), en développe et évalue certaines techniques d’interaction.

Les contributions de la thèse se situent d’abord dans la formalisation de la notion de qualités de mouvement et l’évaluation de son intégration dans un dispositif interactif en termes d’expérience utilisateur. Sur le plan de la visualisation des qualités de mouvement, les travaux menés pendant la thèse ont permis de démontrer que les modèles physiques masses-ressorts offrent de grandes possibilités de simulation de comportements dynamiques et de contrôle en temps réel. Sur le plan de l’analyse, la thèse a permis de développer des approches novatrices de reconnaissance automatique des qualités de mouvement de l’utilisateur. Enfin, à partir des approches d’analyse et de visualisation des qualités de mouvement, la thèse a donné lieu à l’implémentation d’un ensemble de techniques d’interaction. Elle a appliqué et évalué ses techniques dans le contexte de la pédagogie de la danse et de la performance.



# Abstract

The thesis studies gesture in the context of Human-Computer interaction. It aims at creating new interaction paradigms that offer the user further expressive possibilities based on gestures. The theorists and practitioners of dance call "movement qualities" (MQ), a notion that conveys expressive content describing the way a gesture is performed. This notion has been rarely taken into consideration in the field of HCI. Our work draws on collaborations with the field of dance to explore the notion of movement qualities and to integrate it as an interaction modality.

The contributions of the thesis are in the formalism of the notion of movement qualities and evaluation of its integration as interaction modality in terms of user experience. We also provide computational tools for considering MQ in interactive systems in terms of analysis, visual representation and gesture control methods. On the visual representational level, our work have demonstrated that physical models based on masses and springs systems offer great opportunities for simulating dynamics related to MQs and for real-time gesture control. On the analysis level, we developed innovative approaches to automatic real time recognition of movement qualities. Finally, we implemented of a set of interaction techniques based on movement qualities that we applied and evaluated in the context of dance pedagogy and performance.



# Table des matières

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>1</b>
1.1	Contexte et problématique scientifique . . . . .	1
1.2	Contexte Art et Technologies . . . . .	2
1.3	Questions de recherche . . . . .	3
1.4	Contributions de la thèse . . . . .	4
1.4.1	Contributions conceptuelles . . . . .	4
1.4.2	Contributions expérimentales . . . . .	4
1.4.3	Contributions formelles . . . . .	4
1.4.4	Contributions : les applications dans les disciplines artistiques . . . . .	5
1.5	Organisation du manuscrit . . . . .	6
<b>I</b>	<b>Socles Théoriques</b>	<b>9</b>
<b>2</b>	<b>Performance Dansée et Nouvelles IHM</b>	<b>11</b>
2.1	Les performances numériques . . . . .	11
2.1.1	Définition de la performance numérique . . . . .	11
2.1.2	Les prémisses de performance numérique . . . . .	12
2.1.3	« La danse augmentée » . . . . .	12
2.1.4	Outils de notation, et de documentation de la danse . . . . .	16
2.2	La « troisième vague » en IHM . . . . .	22
2.2.1	Exemples d'interactions de la troisième vague . . . . .	23
2.3	Problématiques liées au design de l'interaction . . . . .	28
2.4	Problématiques liées à l'évaluation . . . . .	30
2.4.1	Evaluations spécifiques . . . . .	30
2.4.2	L'expérience utilisateur (UX) . . . . .	31
2.5	Synthèse . . . . .	31
<b>3</b>	<b>Éléments de Qualités de Mouvement</b>	<b>33</b>
3.1	Généralités sur le geste . . . . .	34
3.1.1	Le mouvement, l'action et le geste . . . . .	34
3.1.2	Perspective fonctionnelle du geste . . . . .	35
3.1.3	Théories motrices . . . . .	37
3.2	Qualités de mouvement . . . . .	38
3.2.1	L'analyse du mouvement de Laban (LMA) . . . . .	39
3.2.2	La théorie de l'effort de Laban . . . . .	40
3.2.3	Le « pré-movement » . . . . .	41
3.2.4	Le style . . . . .	43
3.2.5	Le contenu expressif des qualités de mouvement . . . . .	43
3.2.6	L'émotion . . . . .	44
3.3	Utilisation dans des contextes thérapeutiques . . . . .	46



3.3.1	La théorie de Bartenieff pour la danse-thérapie . . . . .	46
3.3.2	Les qualités de mouvement en psychologie . . . . .	46
3.4	La théorie de l'effort utilisée en IHM . . . . .	47
3.5	Etude de cas : vocabulaire gestuel de DS/DM . . . . .	48
3.5.1	L'atelier Double Skin/Double Mind . . . . .	48
3.6	Synthèse . . . . .	54
3.7	Définition proposée . . . . .	55
3.8	Conclusion . . . . .	57
<b>4</b>	<b>Analyse de Qualités de Mouvement</b> . . . . .	<b>59</b>
4.1	Vue d'ensemble de la reconnaissance de gestes . . . . .	59
4.1.1	Des systèmes de captation . . . . .	59
4.1.2	Des modèles de reconnaissance du geste . . . . .	61
4.2	Cahier des charges . . . . .	62
4.2.1	La problématique . . . . .	63
4.2.2	Les contraintes . . . . .	64
4.2.3	Les modèles de reconnaissance de qualités de mouvement développés dans la thèse . . . . .	64
4.3	Méthode 1 : modélisation par système dynamique . . . . .	66
4.3.1	Les dynamiques des qualités de mouvement . . . . .	68
4.3.2	Le système dynamique . . . . .	68
4.3.3	Association des régimes du système dynamique avec les qualités de mouvement . . . . .	69
4.3.4	La captation du mouvement et l'analyse temporelle . . . . .	71
4.3.5	L'identification des paramètres . . . . .	72
4.4	Méthode 2 : modélisation par apprentissage . . . . .	78
4.4.1	La captation du mouvement . . . . .	78
4.4.2	Descripteurs gestuels . . . . .	80
4.4.3	Première phase : la modélisation . . . . .	82
4.4.4	Deuxième phase : la reconnaissance . . . . .	85
4.5	Synthèse comparative . . . . .	86
<b>5</b>	<b>Modèles Physiques</b> . . . . .	<b>87</b>
5.1	Vue d'ensemble . . . . .	88
5.1.1	Les modèles de mécanique des fluides . . . . .	88
5.1.2	Les systèmes masses-ressorts . . . . .	89
5.2	Motivations . . . . .	90
5.2.1	Comportements « physico-réalistes » . . . . .	90
5.2.2	Rendus abstraits . . . . .	91
5.2.3	Capacités de dialogue . . . . .	91
5.2.4	Large choix de contrôles . . . . .	92
5.2.5	Cohérence multimédia . . . . .	92
5.3	Formalisme des modèles masses-ressorts . . . . .	92
5.3.1	Les forces . . . . .	92
5.3.2	Système oscillant à un degré de liberté . . . . .	94
5.3.3	Le schéma d'intégration de Verlet . . . . .	94
5.4	Implémentation : programmation GPU . . . . .	95
5.4.1	Les <i>shaders</i> . . . . .	96
5.4.2	Les textures et les <i>Frame Buffer Object</i> . . . . .	96
5.4.3	La méthode centrée arêtes . . . . .	97
5.4.4	Les « pour » et les « contre » des masses-ressorts en GPU . . . . .	99
5.5	Paramétrage des modèles masses-ressorts . . . . .	100
5.5.1	Choix de l'échelle . . . . .	100
5.5.2	Choix de la topologie . . . . .	101

5.5.3	Choix de la texture . . . . .	105
5.6	Contrôle des MSS . . . . .	106
5.6.1	Stratégie de contrôle de masses-ressorts fins . . . . .	107
5.6.2	Première stratégie de contrôle de masses-ressorts massifs . . . . .	111
5.6.3	Deuxième stratégie de contrôle de masses-ressorts massifs . . . . .	113
5.7	Synthèse . . . . .	115
<b>II Expérimentations</b>		<b>117</b>
<b>6</b>	<b>QM comme Modalité d'Interaction</b>	<b>119</b>
6.1	Question de Recherche . . . . .	119
6.2	Implémentation . . . . .	120
6.2.1	Analyse et captation du mouvement . . . . .	120
6.2.2	L'installation interactive <i>A Light Touch</i> . . . . .	121
6.3	Évaluation . . . . .	122
6.3.1	Dispositif . . . . .	123
6.3.2	Les participants . . . . .	123
6.3.3	Procédure expérimentale . . . . .	124
6.4	Résultats . . . . .	125
6.4.1	L'expressivité, la richesse de l'interaction, la conscience et l'exploration du mouvement . . . . .	126
6.4.2	Qualifications du mouvement . . . . .	127
6.4.3	Relation entre la main de l'utilisateur et la lumière . . . . .	128
6.5	Discussion et conclusion . . . . .	129
<b>7</b>	<b>Classification des Comportements de MSS</b>	<b>131</b>
7.1	Question de recherche . . . . .	131
7.2	Comportements . . . . .	131
7.2.1	Rappel du MSS fin à topologie carrée . . . . .	132
7.2.2	Génération des comportements . . . . .	132
7.3	Participants . . . . .	136
7.4	Conception expérimentale . . . . .	136
7.4.1	Evaluation en ligne . . . . .	136
7.4.2	Procédure expérimentale . . . . .	136
7.4.3	Questionnaire . . . . .	138
7.4.4	Contrôle de l'expérience en ligne . . . . .	138
7.5	Analyse des données . . . . .	138
7.6	Résultats . . . . .	139
7.6.1	Influence du type de comportement sur la perception des qualités de mouvement . . . . .	139
7.6.2	Influence du pré-set sur la perception des QM . . . . .	143
7.7	Synthèse et discussion . . . . .	148
<b>8</b>	<b>Evaluations de DS/DM</b>	<b>151</b>
8.1	Question de recherche . . . . .	151
8.2	Implémentation . . . . .	152
8.3	Première étude . . . . .	154
8.3.1	Participants . . . . .	155
8.3.2	Procédure expérimentale . . . . .	155
8.3.3	Analyse des données . . . . .	157
8.3.4	Observations issues des sessions expérimentales . . . . .	157
8.3.5	Interprétation des entretiens . . . . .	159
8.4	Deuxième étude . . . . .	162

8.4.1	Participants	162
8.4.2	Procédure Expérimentale	163
8.4.3	Analyse des données	164
8.4.4	Résultats	164
8.4.5	Synthèse	167
8.5	Troisième étude	169
8.5.1	Participants	169
8.5.2	Procédure expérimentale	170
8.5.3	Questionnaire et entretiens	171
8.5.4	Analyse des données	172
8.5.5	Résultats	172
8.5.6	Synthèse	178
8.6	Discussion	178
<b>III Conclusion</b>		<b>181</b>
<b>9</b>	<b>Contributions et Perspectives</b>	<b>183</b>
9.1	Rappel des contributions de la thèse	183
9.2	Perspectives	186
9.3	Post-scriptum	187
<b>IV Annexes</b>		<b>189</b>
<b>A</b>	<b>Expérimentation des Masses-Ressorts Massifs</b>	<b>191</b>
A.1	Hypothèse et question de recherche	191
A.2	Méthodologie de conception participative	191
A.2.1	Phase d'exploration initiale	193
A.2.2	Première itération de la phase de découverte	194
A.2.3	Première itération de la phase de prototypage	194
A.2.4	Première itération de la phase de test	198
A.2.5	Deuxième itération de la phase de prototypage	201
A.2.6	Deuxième itération de la phase de test	202
A.2.7	Deuxième itération de la phase de découverte	203
A.2.8	Troisième itération de la phase de prototypage	203
A.2.9	Troisième itération de la phase de test	203
<b>B</b>	<b>Liste des Publications</b>	<b>207</b>

# Chapitre 1

## Introduction

*« Dance, Dance. Otherwise We Are Lost. »  
Pina Bausch*

### 1.1 Contexte et problématique scientifique

L'évolution des technologies de captation du mouvement est vertigineuse : nous disposons aujourd'hui d'outils performants pour la captation de mouvement 3D en temps réel, dans des contextes scientifiques, industriels et artistiques. Et pourtant, dans la plupart des systèmes interactifs utilisant de la captation de mouvement, le traitement des données gestuelles reste très basique : seuls les postures ou les déplacements du corps sont pris en compte. L'utilisateur interagit en général avec la machine, à travers la trajectoire d'une partie de son corps. Nous sommes souvent face à des dispositifs où le paradigme d'interaction est celui de la souris et où le corps de l'utilisateur joue le rôle d'un pointeur. La question qui se pose alors est : Comment prendre en compte dans de tels dispositifs, les variations dynamiques des gestes du corps entier ?

Plus généralement, les possibilités d'expression non-verbales sont encore très limitées dans la plupart des dispositifs interactifs actuels. Une approche pour dépasser ces limites est de proposer de nouveaux paradigmes d'interaction qui offrent à l'utilisateur de plus amples possibilités d'expression à travers le geste. Cela requiert donc une étude approfondie du geste et de son contenu expressif dans les dispositifs interactifs.

Cette réflexion motive l'objectif général de cette thèse qui aborde la problématique de l'étude du geste expressif afin d'engager plus fortement le corps dans l'interaction. Précisément, nous nous intéressons à une notion que les théoriciens et praticiens de la danse appellent « les qualités de mouvement » et qui est très rarement traitée en Interaction Homme Machine.

Cette notion est reconnue comme un vecteur d'expression gestuelle dans le domaine de la danse.

Notre travail de thèse met à profit des collaborations dans le milieu professionnel de la danse pour étudier la notion de qualités de mouvement et l'intégrer à des paradigmes d'interactions gestuelles. Nous appelons dans le reste de ce manuscrit les *interactions QM*, les techniques d'interactions conçues pour prendre en compte explicitement des qualités de mouvement issues du geste de l'utilisateur.

Nous proposons ici une première définition de la notion de qualités de mouvement, qui sera détaillée dans le chapitre 3, comme suit :

Les qualités d'un mouvement sont les façons dont il est exécuté, elles sont produites par la dynamique et sont indépendantes de sa trajectoire spécifique dans l'espace.

Enfin, notre travail de thèse contribue au courant de « l'interaction du corps entier » (ang. *whole-body interaction*) qui consiste à « intégrer la captation et le traitement des signaux humains à partir de sources physiques, physiologiques, cognitives et émotionnelles afin de produire des retours à ces sources pour l'interaction avec un environnement numérique » (England *et al.*, 2010).

## 1.2 Contexte Art et Sciences et Technologies de l'Information et de la Communication

La présente thèse est ancrée dans le paysage Arts-Sciences car elle met à profit des connaissances du geste issues de la danse (les qualités de mouvement) pour élaborer des paradigmes et techniques d'interaction. Par exemple le vocabulaire des qualités de mouvement impliquées dans l'interaction peut provenir du vocabulaire d'un chorégraphe ou de théories de la danse. Nous allons jusqu'à considérer les dispositifs développés dans cette thèse comme des systèmes où il ne s'agit pas simplement de communiquer avec la machine mais de danser avec la machine. Nous pourrions parler « d'interaction Homme-Machine dansée ».

Les Sciences et Technologies de l'Information et de la Communication (STIC) peuvent bénéficier des disciplines artistiques en s'inspirant des modes de communications entre les artistes et le public qui interviennent durant l'expérience esthétique de l'œuvre. Les Interactions Homme-Machine, par exemple, peuvent bénéficier de l'étude de ces modes de communication dans la danse qui permet à travers le geste de transmettre au public des éléments comme des narrations, des esthétiques, des éléments poétiques ou des émotions. La danse dévoile donc toute une gamme de possibilités d'expressions non verbales encore inexplorées dans les interactions Homme-Machine.

Aujourd'hui le bénéfice que les disciplines artistiques peuvent tirer d'une rencontre avec les STIC est de plus en plus admis. Il paraît évident (mais cela n'a pas toujours été le cas) que les nouvelles technologies peuvent offrir des outils de création et de production à l'artiste pour inventer des formes artistiques qui sont impossibles à créer autrement. Nombre de spectacles vivants incluant de la vidéo, de l'interaction ou des éléments de réalité virtuelle peuvent témoigner de l'avènement de cette rencontre entre les arts et les technologies numériques. Ceci résonne d'ailleurs avec la croissance du nombre de festivals d'arts numériques ou de projets de recherche, d'enseignement ou de création Arts et Sciences qui se sont développés récemment en France et dans le monde.

### 1.3 Questions de recherche

L'élaboration de paradigmes d'interaction gestuelle basée sur la notion de qualités de mouvement pose une multitude de questions.

1. Qu'apporte l'intégration de la notion de qualités de mouvement dans l'interaction gestuelle à l'utilisateur ? En d'autres termes quelle est la différence en termes d'expérience utilisateur entre une interaction QM et une interaction directe ?
2. Comment traiter le geste en entrée pour en extraire des qualités de mouvement ou les dynamiques qui y sont apparentées ?
3. Comment générer des retours visuels qui rendent compte des qualités de mouvement de l'utilisateur ?
  - (a) Dans quelle mesure les modèles physiques peuvent générer des comportements dynamiques perçus comme similaires aux qualités de mouvement produites par les utilisateurs ?
  - (b) Comment concevoir les stratégies de contrôle gestuel en temps réel des modèles physiques ?
  - (c) Comment faire évoluer les stratégies de contrôle gestuel des modèles physiques ? Peut-on reconstituer le modèle qui génère les dynamiques du geste en entrée afin de l'utiliser en parallèle pour générer les dynamiques du retour en sortie ?
4. Dans un contexte pédagogique, dans quelle mesure peut-on considérer une interaction QM comme un outil réflexif sur l'apprentissage de la danse ?
5. Dans quelle mesure une interaction QM peut-elle être utilisée comme outil d'expression artistique pour la performance augmentée ?

## 1.4 Contributions de la thèse

### 1.4.1 Contributions conceptuelles

La thèse amène des contributions conceptuelles à travers la formalisation de la notion de qualités de mouvement pour les systèmes interactifs gestuels. Nous proposons :

1. une vue d'ensemble des définitions de la notion de qualité de mouvement et des concepts associés,
2. l'intégration des qualités de mouvement de l'utilisateur dans les interactions gestuelles à des fins expressives.

### 1.4.2 Contributions expérimentales

La thèse a permis de démontrer de manière expérimentale l'apport des interactions QM par rapport à des interactions directes en termes d'expérience utilisateur. Elle a étudié le potentiel représentatif des modèles physiques masses-ressorts et a évalué des interactions QM comme outils réflexifs pour la pédagogie de la danse ou comme outils pour l'expression dans la performance.

1. Nous avons mené une expérience qui a évalué l'apport en termes d'expérience utilisateur des interactions QM dans les paradigmes d'interaction gestuelle. Elle a démontré que celles-ci promeuvent l'expression et l'exploration gestuelles.
2. Nous avons mené une expérience qui démontre que suivant les paramètres adoptés, les visuels par modèles physiques masses-ressorts sont capables de générer des comportements associés à des qualités de mouvement.
3. Nous avons élaboré des expériences utilisateur qui contribuent à évaluer l'impact des interactions QM avec des visuels par modèles physiques masses-ressorts dans un contexte de pédagogie de la danse.
4. Enfin, nous avons exploré l'utilisation des interactions QM avec des visuels pas modèles physiques dans un contexte de « danse augmentée ».

### 1.4.3 Contributions formelles

Afin de réaliser les expérimentations scientifiques autour de nos hypothèses, nous avons implémenté des outils d'analyse et de représentation (simulation et contrôle) propices à l'élaboration d'interactions QM.

1. Nous proposons deux approches d'analyse de qualités de mouvement en temps réel. La première approche est basée sur la modélisation des dynamiques du mouvement (responsables de ses qualités)

par des systèmes dynamiques. Elle utilise des méthodes permettant d'identifier en temps réel les paramètres du système dynamique qui caractérisent le mieux les données gestuelles. La deuxième approche proposée est basée sur le développement de descripteurs (ang. *features*) de qualités de mouvement combinés avec un algorithme de reconnaissance automatique qui repose sur des modèles de Markov cachés (ang. *Hidden Markov Models*).

2. Nous mettons à profit le potentiel des modèles physiques en vue de développer des visuels rendant compte des qualités de mouvement de l'utilisateur. Nous proposons différentes visualisations et stratégies de contrôle en temps réel de modèles masses-ressorts de différentes topologies et échelles.
3. Enfin, une contribution formelle forte à laquelle a abouti notre travail est l'utilisation des systèmes masses-ressorts pour l'analyse des dynamiques gestuelles et pour la représentation conjointe de ces dynamiques. Cette utilisation parallèle du même modèle en entrée et en sortie du système interactif permet de s'affranchir de la couche de contrôle et de trouver un lien direct entre les dynamiques du geste et les comportements du retour visuel.

#### 1.4.4 Contributions : les applications dans les disciplines artistiques

En plus de la contribution de la thèse dans le domaine de l'IHM, les trois dispositifs développés pendant la thèse ont été valorisés dans le milieu artistique :

1. Nous avons développé un dispositif en collaboration avec l'ENSAD sous forme d'installation interactive pour le grand public appelé *A light Touch*. L'installation invite les participants à explorer avec leur main trois dynamiques, oscillatoires, oscillatoires amorties et amorties non oscillatoires, pour contrôler en temps réel des comportements d'une lumière horizontale.
2. Nous avons développé un dispositif en collaboration avec la compagnie de danse Emio Greco | PC sous forme d'installation pédagogique appelée *Double Skin/Double Mind (DS/DM)*. Cette installation permet aux danseurs d'intégrer corporellement les qualités de mouvement constituant le vocabulaire chorégraphique de la compagnie et cela grâce à un retour visuel réflexif sur leurs qualités, basé sur des modèles physiques (masses-ressorts).
3. Enfin, nous avons développé en collaboration avec une danseuse du Ballet National de Marseille, un outil visuel pour la création d'un spectacle de danse augmentée appelée *Chisseling Bodies*. Il propose à la danseuse un environnement d'improvisation où un visuel basé sur



un modèle physique massif (plusieurs milliers de masses et ressorts) crée un duo avec ses qualités de mouvements.

## 1.5 Organisation du manuscrit

La structure du mémoire est illustrée dans la figure 1.1. Nous en décrivons ci-dessous les différents éléments.

- A la suite de cette introduction, le chapitre 2 dresse un état des lieux des travaux où la performance et en particulier la danse est en lien avec les technologies numériques. Ce chapitre explore ensuite la troisième vague en IHM et les différents types d'interactions qui la composent, notamment, l'interaction gestuelle, corporalisée, ou l'interaction du corps entier.
- Le Chapitre 3 a pour objectif d'introduire la notion de qualités de mouvement. Nous donnerons des définitions du geste et des qualités de mouvement, allant des domaines des sciences du mouvement ou de l'étude de la parole aux domaines de l'étude de la danse ou de la psychologie. Nous situerons par la suite l'historique de l'utilisation de la notion de qualités de mouvement dans les interactions Homme-Machine. Ensuite nous figurons la terminologie utilisée dans ce mémoire.
- Le chapitre 4, dans la partie des socles théoriques de ce manuscrit, traite des qualités de mouvement dans la modalité d'entrée des systèmes interactifs. Il présente nos contributions formelles aux approches de reconnaissance et propose deux méthodes d'analyse automatique de qualités de mouvement.
- Le chapitre 5 traite de la représentation des qualités de mouvement par retours visuels ayant des comportements dynamiques générés par des modèles physiques. Il présente d'abord le formalisme mathématique des modèles masses-ressorts. Ensuite il fait état de contributions formelles pour la représentation graphique des qualités de mouvement.
- La partie II comporte 4 expérimentations qui traitent des différentes questions de recherches détaillées dans le paragraphe 1.4.2 et y apportent des éléments de réponse à travers différents dispositifs développés et expériences élaborées. Ainsi, le chapitre 6 évalue l'apport d'une interaction QM par rapport à une interaction où la relation entre le geste et le média numérique est directe. Le chapitre 7 démontre que les modèles physiques masses-ressorts peuvent générer des dynamiques associés par les utilisateurs à des qualités de mouvement. Le chapitre 8 présente trois expériences utilisateurs évaluant l'impact d'une interaction QM avec des visuels basés sur des modèles masses-ressorts, comme un outil réflexif sur la pratique de la danse qui favorise l'expression des qualités de mou-

vement dans un contexte pédagogique. L'annexe A explore l'utilisation de modèles physiques massifs comme outils de création et d'improvisation pour la performance augmentée.

- Enfin, le chapitre 9 résume l'ensemble des contributions de la thèse, présente des perspectives de notre travail et conclut le manuscrit.

**Analyse du Geste Dansé et Retours Visuels par Modèles Physiques:  
Apport des Qualités de Mouvement à l'Interaction**

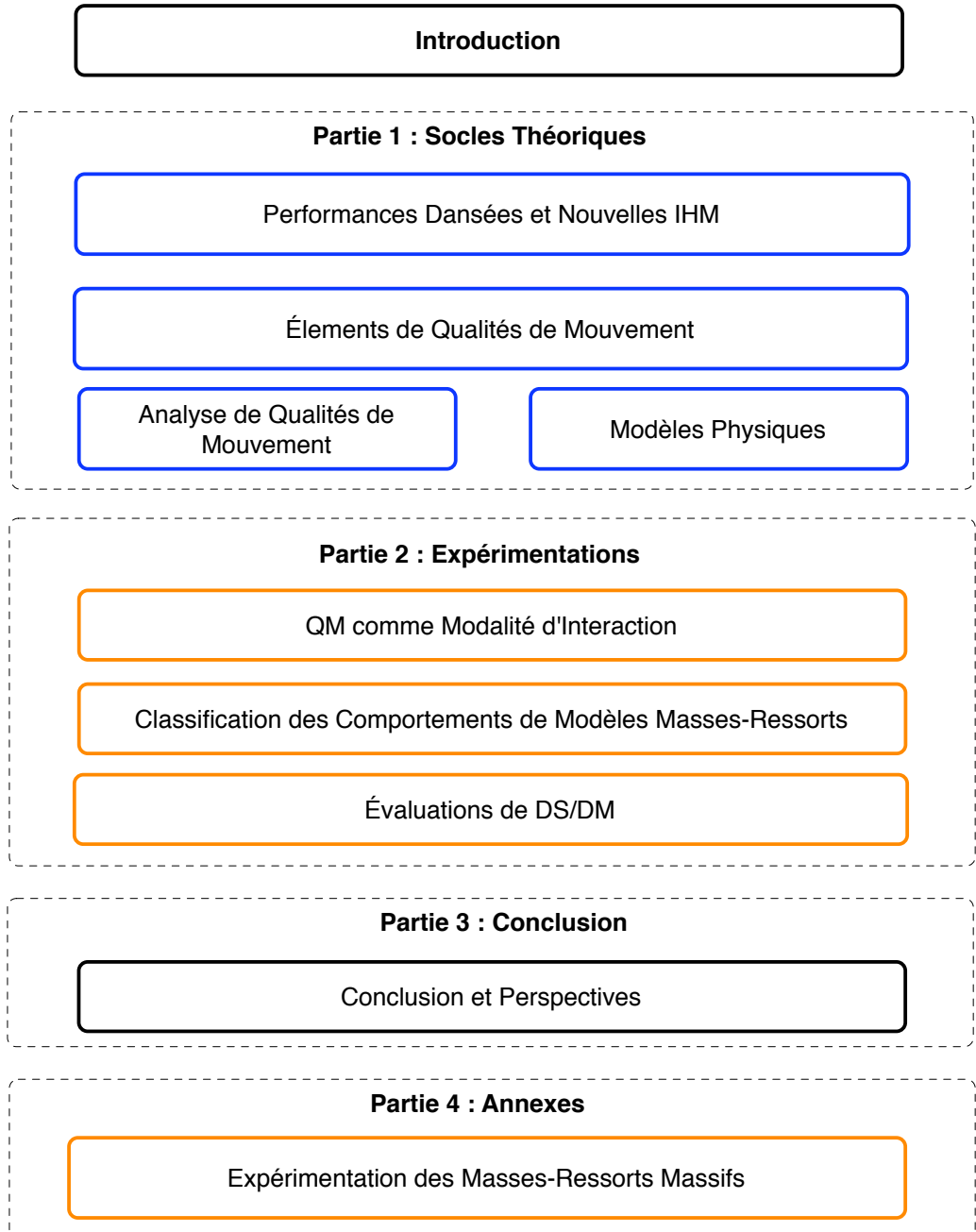


FIGURE 1.1 – Plan de thèse

**Première partie**

**Socles Théoriques**



## Chapitre 2

# Performance Dansée et Nouvelles IHM

### 2.1 Les performances numériques

L'utilisation de technologies diverses, analogiques et numériques, a donné naissance à un grand nombre d'expérimentations, de performances et d'installations, depuis le début des années 60. Pour accompagner ces expérimentations, un certain nombre de logiciels ont depuis été développés, pour des applications à la scène, à la composition, à la chorégraphie ou à l'écriture, à la mise en scène, ou à la documentation de la performance.

#### 2.1.1 Définition de la performance numérique

Parallèlement, à la création artistique, des ouvrages qui formalisent ce nouveau sous-domaine des arts numériques, qu'on appellera « la performance numérique » (ang. *digital performance*), sont apparus. Nous n'en citerons que certains, (Hansen, 2006, Dixon, 2007, Salter, 2010). Nous adoptons dans la présente thèse, la définition de la performance numérique donnée par (Dixon, 2007) dans son ouvrage *Digital Performance* :

Digital performance is all performance works where computer technologies play a key role rather than a subsidiary one in content, techniques, aesthetics, or delivery forms (page 2, (Dixon, 2007)).

Nous parlerons dans la suite de cette section de « performance augmentée », terme utilisé par (Sparacino *et al.*, 1999, 2000) par analogie avec le terme « Réalité Augmentée », qui s'oppose à la « Réalité Virtuelle », pour désigner les performances numériques qui explorent les possibilités offertes par les technologies informatiques afin d'étendre sur scène la grammaire des arts traditionnels. Sparacino *et al.* (1999) précisent que l'objectif

n'est pas de suggérer des moyens ou des contextes pour remplacer l'acteur « réel » par un acteur « virtuel » mais bien d'enrichir ou d'augmenter la scène au travers d'artefacts numériques. Cela rejoint l'argumentaire de (Coniglio, 2004) au sujet de l'utilisation de technologies interactives dans les performances de la compagnie Troika Ranch :

[...] to create dynamic, challenging artworks that fused traditional elements of dance, music and theatre with interactive digital media. We believed that by directly linking the actions of a performer to the sound and imagery that accompanied them, we would be led to new modes of creation and performance and, eventually, to a new form of live art work. While we cannot yet claim to have reached this latter, rather lofty, goal we have firmly established our views about interactive performance and its importance to the performer and audience (Coniglio, 2004).

### 2.1.2 Les prémisses de performance numérique

Les prémisses des expérimentations performatives augmentées utilisant des technologies interactives et « réactives », remontent à 1966, avec *9 Evenings*<sup>1</sup>. C'est la première collaboration entre des artistes dont des plasticiens tel que Robert Rauschenberg, des compositeurs tels que John Cage, et des chorégraphes tels que Steve Paxton et Lucinda Childs ainsi que des ingénieurs et des scientifiques de Bell Laboratories, qui a eu pour objectif d'incorporer dans des performances artistiques des systèmes technologiques. Ils ont notamment utilisé la projection vidéo et la télévision, la transmission sans fil, la caméra infra-rouge, et le Doppler sonar.

Mais les pionniers des arts numériques, dans les années 80 sont Myron Krueger (Krueger *et al.*, 1985) et David Rokeby (Rokeby, 1995, 1998) qui ont fait les premières tentatives de création d'environnements interactifs sophistiqués où l'outil numérique est considéré comme un médium à part entière. Ils ont inventé les toutes premières installations artistiques réactives ou interactives centrées sur le mouvement corporel. Ils ont ainsi insufflé l'émergence de toute une génération d'œuvres où le mouvement est utilisé pour contrôler ou interagir en temps réel avec des sons et des visuels.

### 2.1.3 « La danse augmentée »

Nous introduisons dans cette section le terme de « danse augmentée », qui est un cas particulier de « la performance augmentée » introduite dans la section précédente, qui désigne les spectacles de danse qui explorent les possibilités offertes par les technologies informatiques afin d'étendre sur scène leur contenu chorégraphie ou leur scénographie.

1. Le site Internet de E.A.T 9 Events accédé le 28/10/2012 : <http://www.9evenings.org/>

**a) Historique**

Dans le cas de la danse, le chorégraphe Merce Cunningham est la figure la plus connue pour avoir exploré dès les années 90, des outils comme la captation de mouvement ou la visualisation par ordinateur. Dans sa célèbre pièce de danse augmentée, *BIPED*<sup>2</sup> (1999), illustrée figure 3.1, des images de « danseurs » virtuels sont projetées sur scène. Ces animations ne sont pas interactives, mais sont constituées à partir de la captation pré-enregistrée, des mouvements des danseurs de la compagnie.



FIGURE 2.1 – La Pièce *BIPED* de Merce Cunningham, 1999.

Plus tard, l'utilisation des médias numériques interactifs pour la scène augmentée, émergera dans les années 90 avec les compagnies Palindrome<sup>3</sup> et Troika Ranch<sup>4</sup>. La compagnie Palindrome se définit sur son site Internet, comme « un groupe de performance utilisant des technologies de captation de mouvement, entre autres, physiologiques pour que les danseurs ou acteurs contrôlent en temps réel, la musique, la lumière ou les projections vidéos ». Au départ Mark Coniglio et Dawn Stoppiello de Troika Ranch utilisent des technologies interactives dans la danse, pour une raison bien pragmatique : ils voulaient mettre à profit le système de capta-

---

2. BIPED est documenté dans le site Internet de Gavin Bryars accédé le 28/10/2012 : <http://www.gavinbryars.com/Pages/biped.html>

3. Le site Internet de la compagnie Palindrome accédé le 28/10/2012 : <http://www.palindrome.de/>

4. Le site Internet de la compagnie Troika Ranch accédé le 28/10/2012 : <http://www.troikaranch.org/technology.html>



tion de flexion appelé MidiDancer qu'ils avaient pu développer en 1989, et qui permettait de contrôler en temps réel la lumière, la musique ou la vidéo avec les mouvements des danseurs (Coniglio, 2004). Dix ans plus tard, leurs motivations évoluent et concernent le caractère reproductible des médias numériques qui est précisément ce qui les distingue de la performance qui est de nature changeante suivant à la compétence, le tempérament des artistes ainsi que l'attitude et l'engagement du public.

Suivront plusieurs expérimentations de danse augmentée qui utilisent des outils issus des domaines tels que la captation de mouvement 3D, la simulation de mouvement par avatars ou par rendus abstraits, la robotique ou le traitement d'image. Par exemple, en 2000, la performance-installation *Contours* par Susan Kozel<sup>5</sup> fait usage de captation de mouvement par le biais de caméras infra-rouge et traduit l'information cinétique issue du mouvement des danseurs en temps réel dans l'image numérique. Selon le cas, l'image numérique peut être vue soit comme une scénographie interactive ou comme un élément abstrait du spectacle créant un duo et un dialogue avec les acteurs ou les danseurs. Cette idée de duo danseurs-visuels est reprise par la chorégraphe Trisha Brown qui collabore avec le chercheur Marc Downie en 2005 pour *How long does the subject linger on the edge of the volume...*<sup>6</sup>. Cette pièce présente des interactions où l'artefact numérique est pensé comme un élément du spectacle en duo avec les danseurs. Pour cela, Downie a développé un système qui utilise les données issues de la captation du mouvement 3D pour « nourrir » les comportements d'agents autonomes et générer des duos avec des visuels abstraits interactifs. Pour ce qui est des interactions où l'artefact numérique est pensé comme une scénographie interactive, citons à titre d'exemple, les spectacles *Mortal engine* du chorégraphe australien Gideon Orbazanek<sup>7</sup> ou les spectacles de la compagnie de danse danoise Recoil<sup>8</sup>.

## b) Les logiciels pour la danse augmentée

L'élaboration des spectacles de danse augmentée requiert des développements logiciels tels que la captation, l'analyse ou la synthèse du mouvement. Généralement, ces logiciels sont mis en œuvre dans des environnements de programmation tels qu'Isadora<sup>9</sup>, Max/MSP (Puckette *et al.*,

5. Le site Internet de Susan Kozel accédé le 28/10/2012 : <http://www.meshperformance.org/contourtext.html>

6. Le site Internet de Trisha Brown accédé le 28/10/2012 : <http://www.trishabrowncompany.org/?page=view&nr=610>

7. La page Internet du spectacle *Mortal engine* accédée le 28/10/2012 : <http://www.frieder-weiss.de/works/all/Mortal-Engine.php>

8. Le site Internet de la compagnie Recoil accédé le 28/10/2012 : <http://recoil-performance.org/>

9. Le site de la plate-forme Isadora accédé le 28/10/2012 : <http://troikatronix.com/>

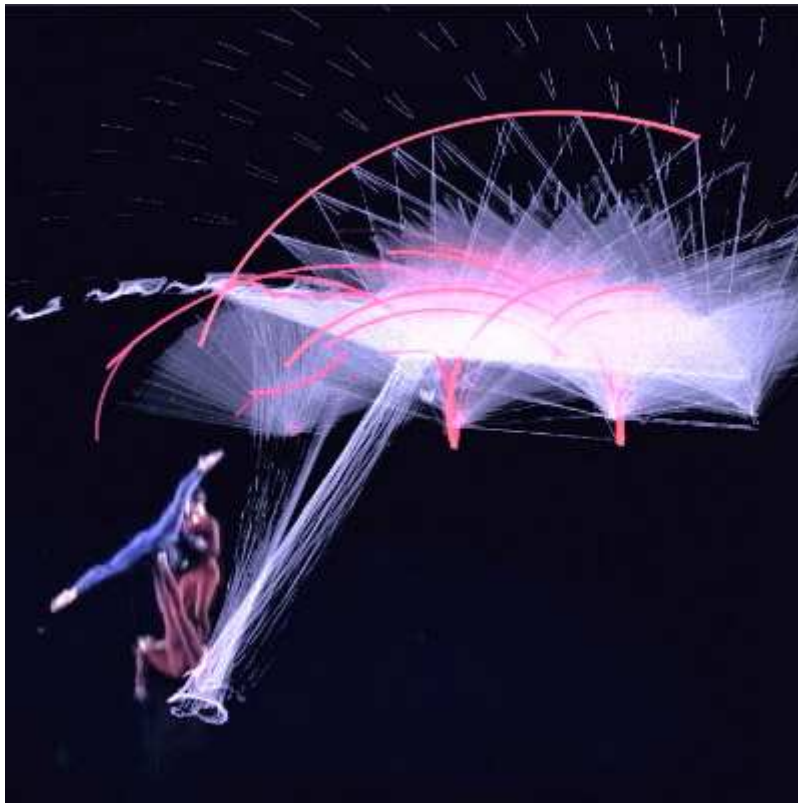


FIGURE 2.2 – La Pièce *How long does the subject linger on the edge of the volume...* de Trisha Brown, 2005.

1998), Pure Data<sup>10</sup>, Processing ou OpenFrameworks. Isadora est une plateforme largement utilisée sur scène et particulièrement pour la danse (augmentée), notamment par la compagnie Troika Ranch. Elle permet une gamme de manipulations et de contrôles en temps réel de médias numériques. Par ailleurs, Max/MSP (Puckette *et al.*, 1998) ou Pure Data sont aussi des plateformes de programmation visuelle (par flot de données), initialement conçues pour le traitement du signal sonore, qui ont largement été utilisées pour la danse et le spectacle vivant, notamment à travers les collaborations Arts et technologies produites à l'Ircam. Processing<sup>11</sup> et OpenFrameworks<sup>12</sup> sont des boîtes à outils donnant accès plus facilement que les langages de programmation standard à certaines fonctionnalités utiles dans les arts numériques, telles que la gestion de données de captation ou la synthèse d'image.

10. Le site de la plateforme Pure Data accédé le 28/10/2012 : <http://puredata.info/>

11. Le site Internet de Processing accédé le 28/10/2012 : <http://puredata.info/>

12. Le site Internet d'OpenFrameworks accédé le 28/10/2012 : <http://www.openframeworks.cc/>

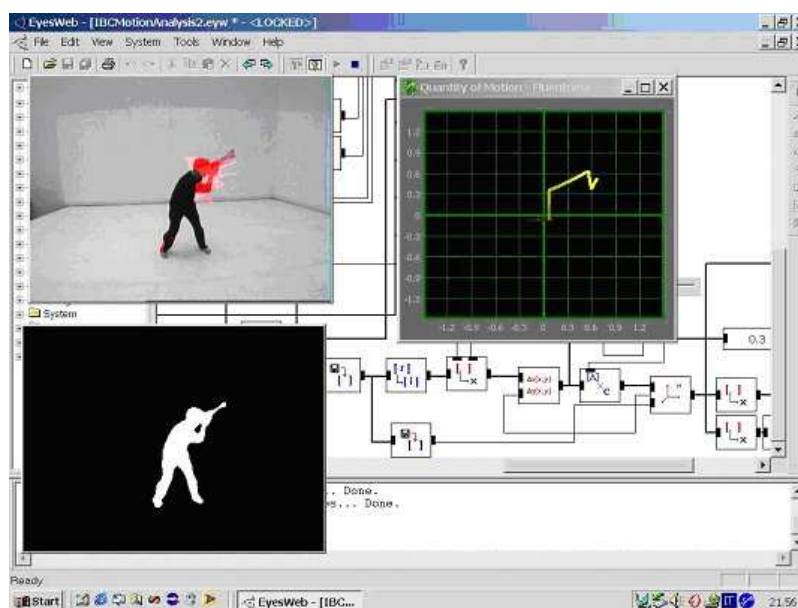


FIGURE 2.3 – La plate-forme Eyesweb

De plus, Camurri *et al.* (2000) ont développé la plate-forme Eyesweb, illustrée dans la figure 2.3, d'analyse du geste expressif du corps entier et particulièrement du geste dansé, pour des applications à la scène augmentée. Volpe (2003) définit dans sa thèse de doctorat l'architecture de cette plate-forme, qui analyse le signal gestuel physique à l'aide de descripteurs de haut niveau liés à la théorie de l'effort de Laban (1994). Elle fournit un module de classification du mouvement suivant certaines émotions ainsi qu'un module de contrôle gestuel d'artefacts numériques multimodaux. Notez que le travail autour de la plate-forme Eyesweb sera cité et discuté, dans le chapitre 4 de ce manuscrit car il représente une référence essentielle de notre thèse. Notre contribution se distingue de celle de Camurri et al dans Eyesweb, car notre objectif est d'identifier les qualités de mouvement de l'utilisateur (et non les émotions) à des fins interactives. De plus, contrairement à Camurri et al, nous nous intéressons à des caractéristiques du mouvement spécifiques à chaque approche chorégraphique étudiée. Cependant, les méthodes que nous proposons peuvent être re-spécifiées dans le cadre d'autres approches chorégraphiques, pour peu que l'on dispose d'une bonne connaissance préalable du vocabulaire étudié.

#### 2.1.4 Outils de notation, et de documentation de la danse

La danse a été qualifiée d'éphémère depuis fort longtemps. Elle est perçue comme une métaphore de la vie, en constante transformation et mutation

d'une forme à une autre ne laissant après le spectacle aucune trace tangible. C'est là-même que réside sa beauté fragile mais aussi une des problématiques qui a beaucoup occupé les théoriciens de la danse : quels sont les moyens de la transmettre cet art aux générations futures ?

Ainsi, la notation, ou documentation de la danse pose plusieurs questions : « Quels modèles doit-on adopter afin de codifier (de façon universelle) le geste dansé ? ». « A quel niveau de détail faut-il se placer pour décrire la danse : le geste, le phrasé, la séquence ou la pièce entière ? ». Au-delà de la vidéo, « Comment capter des caractéristiques gestuelles qui en font l'essence, telles que les qualités de mouvement par exemple ? » Enfin, « comment traiter en temps réel la quantité d'information phénoménale contenue dans le geste dansé, due à sa grande complexité et parfois même sa multi-modalité ? ».

Cette problématique de codification du geste dansé est encore d'actualité, et aucun consensus méthodologique n'a encore été apporté. DeLahunta (2002) en propose une réflexion approfondie en particulier sur l'utilisation de solutions logicielles pour traiter ce problème.

#### a) Les logiciels d'assistance à la chorégraphie

La codification du geste est utile pour assister la chorégraphie en générant des matériaux, en documentant ou en notant le processus de création d'un chorégraphe pendant les répétitions. Le premier exemple de logiciel d'assistance à la chorégraphie connu est Life Forms. Il a été conçu par Tecla Schiphorst et ses collègues pour alimenter le travail chorégraphique de Merce Cunningham majoritairement basé sur des enchaînements de postures fixes (Schiphorst et Cunningham, 1997). Life Forms, illustré dans la figure<sup>13</sup> 2.4, anime un squelette en 3D et génère des postures et leurs enchaînements que Cunningham demande à ses danseurs de reproduire. Ceci dit, peu d'autres logiciels d'assistance à la chorégraphie ont vu le jour. Cela peut être dû à la très grande variabilité des supports et des méthodes d'écriture du mouvement des chorégraphes contemporains, qui sont très souvent idiosyncratiques et personnelles.

Plus récemment, le projet *Transmedia Knowledge Base for contemporary dance project* (TKB)<sup>14</sup> a développé un outil d'annotation de vidéos multi-modal pour la danse contemporaine (Cabral *et al.*, 2011) que nous illustrons dans la figure 2.5 (l'image est extraite du site Internet du projet). Cet outil a été conçu avec et à destination du chorégraphe Rui Horta, pour l'assister pendant son processus d'écriture. Cependant, cet outil a aussi été utilisé par le

13. L'image est extraite du site Internet accédé le 28/10/2012 : [www.charactermotion.com](http://www.charactermotion.com)

14. Le site du projet TKB, accédé le 28/10/2012 : <http://www.clunl.edu.pt/en/projecto.asp?id=1556&mid=194&mii=>

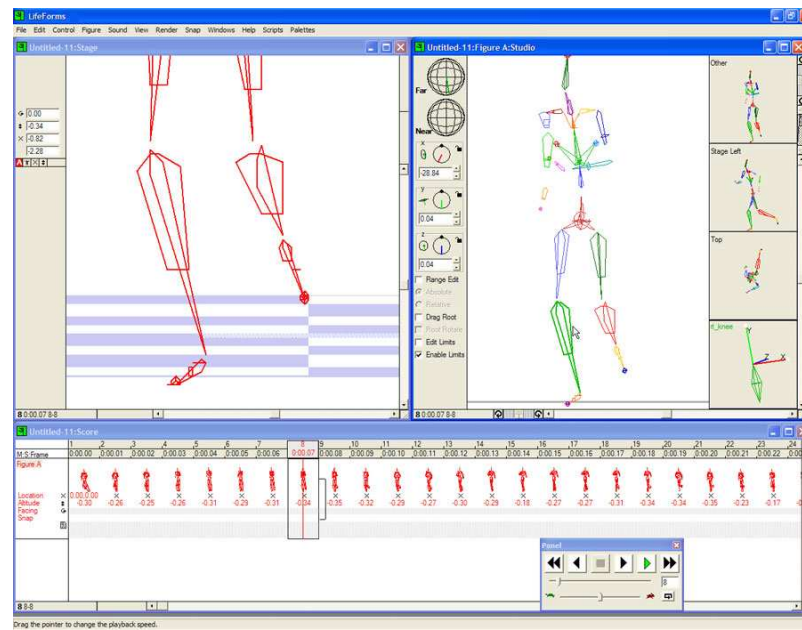


FIGURE 2.4 – Life Forms : Outil de générations de postures

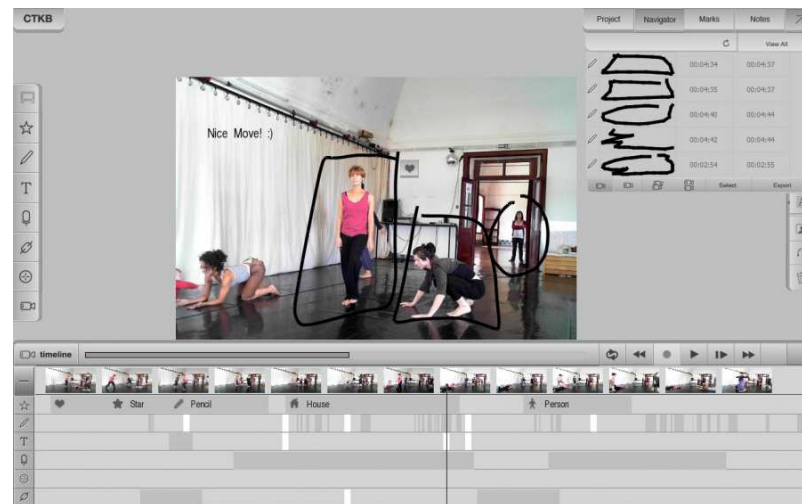


FIGURE 2.5 – Outil d'annotation vidéo multi-modale pour la danse issu du projet TKB

projet TKB pour la documentation du répertoire de danse de Rui Horta.

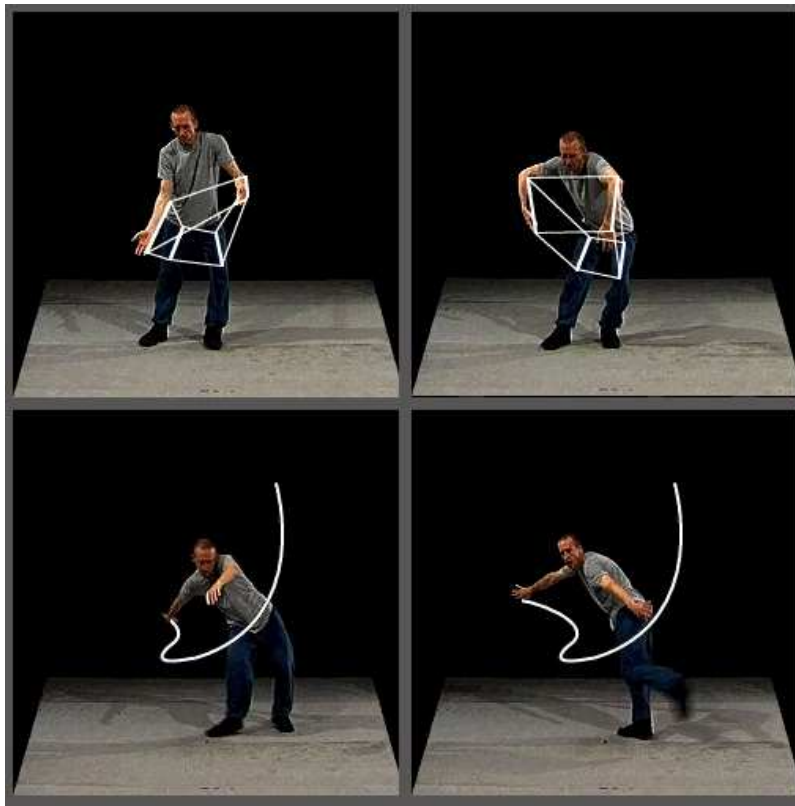


FIGURE 2.6 – Démonstrations vidéos issue du CD-ROM *Improvisation Technologies* de William Forsythe et Christian Ziegler

### b) La documentation de la danse

Nous citons ici des projets qui se situent sur différentes échelles de documentation de séquences dansées, de gestes issus du vocabulaire spécifique d'un chorégraphe ou d'une pièce de danse entière. Ils ont été diffusés par des CD-ROM, DVD, sites Internet, logiciels, interfaces ou installations.

Par exemple, Christian Ziegler a conçu le CD-ROM *Improvisation Technologies*<sup>15</sup> dont l'objectif est de présenter de façon pédagogique les principes essentiels des techniques d'improvisation du chorégraphe William Forsythe. Le CD-ROM fournit, comme l'illustre la figure 2.6 (l'image est extraite du site Internet de William Forsythe), des images et des vidéos démonstratives augmentées graphiquement avec des éléments géométriques à l'échelle du mouvement.

Du même chorégraphe, la pièce *One Flat Thing Reproduced*, a été étudiée

15. Le site Internet de William Forsythe, accédé le 28/10/2012 : [http://www.movingimages.de/index.php?type=arts&txt\\_id=10&lng=eng](http://www.movingimages.de/index.php?type=arts&txt_id=10&lng=eng)

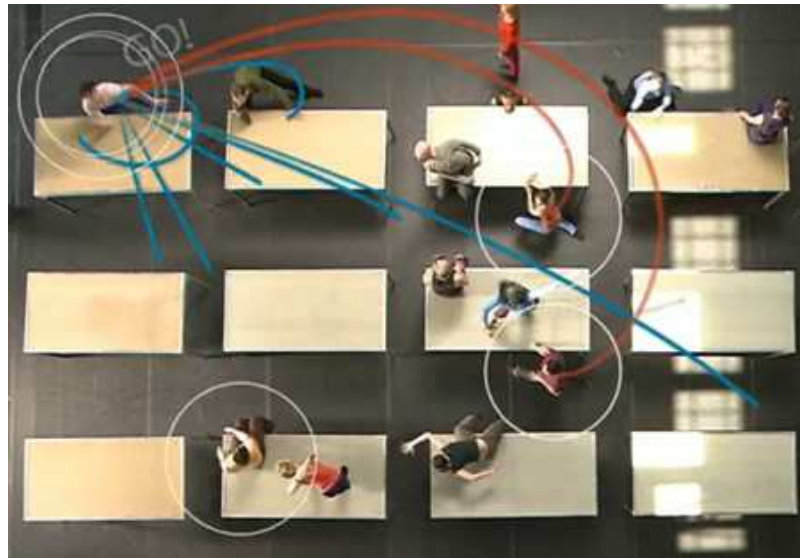


FIGURE 2.7 – Une des notations de la pièce de William Forsythe *One Flat Thing Reproduced* issue du projet *Synchronous Objects*

par Palazzi et Shaw (2009). Ils ont développé le site internet *Synchronous Object*<sup>16</sup> qui augmente des vidéos du spectacle avec des visualisations d'indices (ang. *cues*) des structures chorégraphiques de la pièce, comme illustré dans la figure 2.7.

Une approche plus générale de documentation du geste dansé a été adoptée par le chorégraphe Blumentha Bud dans le site internet D.A.N.C.E.R.S<sup>17</sup>. Ce site regroupe une base de données de phrases chorégraphiques improvisées courtes, exécutées par plusieurs chorégraphes. Tardieu *et al.* (2010) y ont développé un outil de navigation doté d'un classifieur automatique qui regroupe les performances en *clusters* suivant certains critères issus de l'analyse par descripteurs gestuels

Le projet (TKB), que l'on cite dans le paragraphe précédent, s'est attelé à documenter de façon microscopique quelques œuvres du chorégraphe Rui Horta à partir de méthodes et logiciels utilisés en linguistique (Fernandes et Costa, 2010) et de l'outil d'annotation qu'ils ont développé. Les méthodes linguistiques sur lesquelles s'appuient leurs résultats sont les mêmes (en partie) que celles qui ont été utilisées par la compagnie de danse EG | PC afin d'élaborer un glossaire détaillé du vocabulaire chorégraphique de leur atelier *DS/DM* et ainsi que dans leur pièce, *Extra Dry* (Wijers *et al.*, 2010).

16. Le site Internet du projet Synchronous objects accédé le 28/10/2012 : <http://synchronousobjects.osu.edu/>

17. Le site Internet du projet D.A.N.C.E.R.S accédé le 28/10/2012 : <http://www.dancersproject.com/browse/>

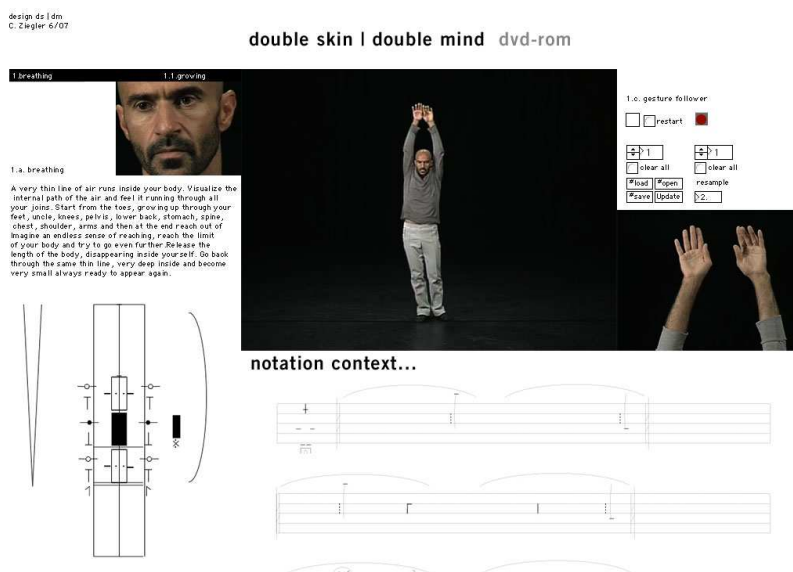


FIGURE 2.8 – Une page du DVD-ROM *capturing Intention* comportant une documentation et des notations Laban ou Benesh pour un des composants de l'atelier DS/DM de la compagnie EG | PC

D'ailleurs, la compagnie EG | PC s'est intéressée à la problématique de documentation de la danse depuis près de 10 ans. Elle a initié un premier projet visant à utiliser les nouveaux médias comme un moyen potentiel de documenter et noter la danse (DeLahunta, 2007, Bermudez, 2009). Il en a résulté l'ouvrage et le DVD-ROM *Capturing intention*, dont une des pages est illustrée figure 2.8. Le DVD-ROM fournit pour chaque geste du vocabulaire étudié, des descriptions linguistiques, des notations Laban et Benesh, et des extraits vidéos démonstratifs.

Par la suite, la compagnie a poursuivi avec un deuxième projet appelé *Inside Movement Knowledge*<sup>18</sup> auquel nous avons contribué. Des disciplines (avec leurs outils spécifiques), telles que la linguistique, les notations de la danse (Laban et Benesh), la captation du mouvement et les synthèses sonore et graphique ont été impliquées dans ce projet afin d'étudier, de noter et d'élaborer des interactions gestuelles à partir du vocabulaire de DS/DM. Par exemple, le projet a produit un glossaire complet et détaillé décrivant qualitativement le vocabulaire étudié. Il a aussi développé une installation interactive appelée DS/DM qui adresse la problématique de l'utilisation des technologies et de l'interaction pour transmettre l'atelier de la compagnie aux générations futures. Nous avons contribué à la conception et au déve-

18. Le site Internet de la compagnie EG|PC accédé le 28/10/2012 : <http://www.ickamsterdam.com/>



loppement de cette installation interactive et pédagogique *DS/DM* en nous basant principalement sur le glossaire élaboré, mais aussi sur les connaissances collectées dans les autres disciplines notamment, la notation Laban du vocabulaire gestuel.

Cette installation interactive, décrite dans la section 3.5 de ce manuscrit, fera l'objet de plusieurs parties théoriques et expérimentales qui y figurent. Dans cette installation, nous nous sommes intéressée à la notion de qualités de mouvement issue de la danse. L'objectif était d'étudier les qualités de mouvement afin de proposer une interaction qui offre à l'utilisateur de plus amples possibilités corporelles d'expression à des fins pédagogiques. Cet objectif a ensuite été élargi à d'autres contextes d'interactions gestuelles et a ouvert une nouvelle perspective pour l'enrichissement des paradigmes d'interaction des futures IHM à travers l'utilisation des qualités de mouvement comme modalité d'interaction. Nous glissons déjà sur la troisième vague d'IHM!

## 2.2 La « troisième vague » en IHM

Dans cette section, nous présentons le contexte historique et technologique de l'émergence d'une nouvelle génération d'interactions corporalisées en faisant un détour par l'histoire de l'IHM.

Le domaine de l'IHM a connu, dans les années 80, une évolution des principes de conception vers une meilleure prise en compte des règles d'ergonomie, grâce à diverses théories de traitement de l'information. Cela a constitué ce qui est appelé la « première vague » de l'IHM (Fallman, 2011). Ces théories permettent de prédire quantitativement les performances des utilisateurs afin d'évaluer l'adéquation de différents types d'interfaces à une tâche donnée. On se réfère à la définition de (Dix, 2004) de l'ergonomie comme étant le concept qui permet d'évaluer les modèles afin de s'assurer qu'ils se comportent réellement comme prévu par les concepteurs et répondent aux exigences de l'utilisateur.

La « deuxième vague » en IHM, a déplacé le centre de l'attention de la première vague, qui selon (Fallman, 2011) « mettait l'accent sur un utilisateur unique exploitant une seule application », vers des communautés bien définies d'utilisateurs qui collaborent éventuellement en utilisant une variété d'applications.

Enfin, Fallman (ibid.) contextualise l'avènement de la « troisième vague » en IHM ainsi :

In the early to mid- 2000s, it became increasingly obvious and accepted that HCI could no longer just be concerned with Western people using technology at work. To remain relevant, HCI needed to broaden

its scope substantially : it needed to study and design for technology use in a wide variety of contexts [...] HCI became rapidly interested in issues such as meaning, complexity, culture, emotion, lived experiences, engagement, motivation, and experience—HCI's 'third wave' (Fallman, 2011).

Selon Fallman, cette dernière vague intègre dans la conception de technologies l'analyse culturelle, la théorie critique, la philosophie, les valeurs et l'histoire, davantage que les théories sociologiques ou psychologiques. Cela fait écho à la vision Post WIMP (*windows, icons, menus, pointer*) défendue par Beaudouin-Lafon (2004). Il souligne les limites des interfaces traditionnelles de type WIMP face à la croissance de la quantité d'informations provenant de l'utilisateur ; sa distribution sur plusieurs ordinateurs et périphériques, ainsi que la grande variété d'utilisateurs, de compétences, de besoins et d'attentes. Il préconise de passer de la conception d'interfaces à la conception de l'interaction, notamment à travers la conception d'interactions instrumentales.

### 2.2.1 Exemples d'interactions de la troisième vague

Les nouveaux dispositifs interactifs de la troisième vague sont concernés par des « aspects alternatifs » tels que la corporalité (ang. *embodiment*), l'expression gestuelle, les émotions ou l'esthétique. L'objectif est d'inventer des relations riches avec la machine et d'encourager l'exploration, la réflexion et la curiosité (Gaver *et al.*, 2004b).

#### a) Gestes et interactions

Billinghurst et Buxton (2009) promeuvent la nécessité de développer de nouvelles techniques d'interaction reposant sur les informations expressives contenues dans le geste, au sens de la définition du geste de Kurtenbach et Hulteen (1990). Contrairement aux taxonomies gestuelles très riches présentées section 3.1, Billinghurst et Buxton affirment que les interactions Homme-Machine traditionnelles sont presque entièrement dénuées de contenu et de connaissance du geste. Ils constatent que le paradigme dominant dans les IHM « traditionnels » est la manipulation directe et que les interfaces gestuelles les plus avancées ne mettent généralement en œuvre que la reconnaissance de gestes « symboliques » ou « déictiques » au sens de la classification de McNeill (2000). Billinghurst et Buxton promeuvent donc les techniques d'interaction basées sur le geste car, selon eux, elles mettent à profit des gestes naturels en entrée, ainsi qu'une richesse qui permet de spécifier à la fois une commande et ses paramètres pertinents dans un seul bloc cognitif. Cependant, cela nécessite de développer d'autres périphériques d'entrée que ceux dont sont dotées les interfaces actuelles. Ces nouveaux périphériques doivent être capables de prendre en compte un nombre plus

élevé de degrés de liberté dans le geste. Utiliser des périphériques tels que la souris ou le clavier ne permet pas de distinguer si l'utilisateur a appuyé par exemple sur une touche avec, pour reprendre Billingham et Buxton (2009), « amour » ou « colère ».

Nous adoptons pour l'ensemble des interactions gestuelles développées dans la présente thèse, la définition de Billingham et Buxton (2009), des interactions basées sur le geste comme celles où le geste est ce qui est articulé, exprimé et reconnu, plutôt que de prendre en compte seulement la conséquence du geste. Le travail que nous proposons est une contribution à l'étude et au développement d'interfaces gestuelles de la troisième vague, en conduisant des recherches sur des caractéristiques expressives du geste, les qualités de mouvement.

#### **b) Les interactions du corps entier**

La présente thèse se situe entre Art et Science et développe des dispositifs interactifs de troisième génération utilisant le geste en entrée. En particulier, elle utilise l'interaction du corps entier dans le contexte de la danse, pour la pédagogie ou la scène. Plus généralement, elle . L'interaction du corps entier a émergé ces dernières années comme une activité interdisciplinaire impliquant des informaticiens, des chercheurs en IHM, des scientifiques, des sociologues, des artistes et autres. La motivation initiale provient de chercheurs tels que Buxton (1986), qui promeuvent des interactions « naturelles » avec les ordinateurs. Ils considèrent que ces interactions ne peuvent être atteintes si elles impliquent seulement une gamme limitée d'actions de l'utilisateur, et une compréhension limitée par l'ordinateur de l'utilisateur. L'hypothèse de l'interaction du corps entier est que les dispositifs numériques interactifs pourrait être améliorée en exploitant justement une gamme complète des capacités humaines dans les scénarios d'interaction. Ainsi, le mouvement physique, l'émotion, la cognition ou le contexte social peuvent tous être pris en compte par le dispositif interactif (England, 2011).

Cependant, de nombreux défis subsistent. Parmi eux, il y a la compréhension rationnelle de l'ensemble des informations provenant de l'utilisateur pour leur donner sens dans une situation donnée. Cette compréhension est de plus en plus favorisée grâce à l'évolution entre autres, des dispositifs de détection du mouvement ou d'analyse des états émotionnels de l'utilisateur. Citons aussi les enjeux philosophiques importants dans l'interaction du corps entier qui rejoignent ceux de l'interaction corporalisée qui consistent à disposer d'un modèle de la « connaissance du monde », par exemple fondé sur la *phénoménologie* de Merleau-Ponty (Dourish, 2004).

### c) Les interactions corporalisées

Parmi les nombreux domaines influencés par la théorie de l'*enaction* liant l'action à la perception de l'environnement (Varela *et al.*, 1991, Noë, 2005) figure le domaine de l'IHM (Dourish, 2004). La théorie de l'*enaction* analyse, à travers le canal gestuel, le lien entre la perception et l'action. Cette théorie s'est inspirée d'abord des travaux précurseurs de philosophes et phénoménologues comme Merleau-Ponty qui a étudié le lien entre l'expérience et la conscience (Merleau-Ponty, 1968). Il s'est intéressé à la phénoménologie appliquée à la perception afin de dépasser les positions encore répandues, des subjectivistes, où le monde existait uniquement à travers l'esprit, et des objectivistes, où le monde existait indépendamment de l'esprit.

Suivant ce courant de pensée, Noë (2005) argumente, dans son ouvrage *Perception in Action*, qu'il existe une interdépendance entre l'environnement, le corps et l'esprit, sur laquelle s'ajoute la construction propre liée notamment à la culture, l'histoire ou le lieu. Il explique cela comme le phénomène où le monde est perçu grâce à l'expérience de ce monde, à travers le mouvement physique et l'interaction avec lui. Inversement, notre perception du monde extérieur guide nos actions. L'approche de la cognition nommée l'*enaction* s'appuie sur la théorie de l'action-perception. (Varela *et al.*, 1991) définit l'*enaction*, dans son ouvrage *L'inscription corporelle de l'esprit*, comme l'approche qui considère la *cognition* comme une *action corporalisée* (ang. *embodied*), ni subjective ni objective. Le terme *corporalisé* souligne ici, que la cognition dépend des types d'expériences qui découlent du fait d'avoir un corps doté de diverses capacités sensori-motrices. La théorie de l'*enaction* s'est trouvée renforcée par de nombreux travaux dans le domaine des neurosciences, notamment avec la découverte des neurones miroirs (Kohler *et al.*, 2002, Gallese, 2005, Rizzolatti et Craighero, 2004).

L'approche phénoménologique favorisant une expérience corporalisée de l'interaction (ang. *embodied interaction*) a eu un écho très favorable dans la communauté IHM (Webb *et al.*, 2006, Schiphorst, 2009, Loke et Robertson, 2010, Feltham *et al.*, 2011), illustré par la création de la conférence TEI (Tangible and Embodied Interactions) en 2007. Cependant l'interprétation de la théorie de l'*enaction* dans l'IHM est très variée d'un projet à l'autre.

A titre d'exemple, l'interaction corporalisée proposée dans le projet *CLOUD*, auquel nous avons contribué, est réalisée au moyen de l'expérimentation en temps réel de la transformation du corps en une matière virtuelle. L'expérience proposée à l'utilisateur consiste à le transformer en nuage/avatar qu'il contrôle en temps réel grâce à son geste. Il peut expérimenter corporellement la matière lorsque l'avatar conserve une forme humaine ou lorsqu'il devient une masse trouble sans limites perceptibles (Delprat *et al.*, 2011a,b). Un autre exemple d'interaction corporalisée proposée par Sha *et al.* (2009), repose sur ce qu'ils appellent l'intuition « kinesthétique » corporelle de l'uti-

lisateur afin de manipuler en temps réel des visuels complexes générés par modèles physiques thermodynamiques. Certains auteurs ont exploré le potentiel du toucher pour produire des expériences esthétiques de l'interaction corporalisée. D'une part, Schiphorst (2009) s'est intéressée à l'expérience *soma-esthétique* (ang. *somaesthetic*) des différentes qualités du toucher qu'elle a modélisées grâce aux efforts de Laban, décrits dans la section 3.2.2 de ce manuscrit. Le terme soma-esthétique est inspiré de la théorie de l'enaction, et désigne l'étude pluridisciplinaire méliorative de l'expérience du corps vivant (ou soma) comme une source d'appréciation sensori-esthétique. C'est une discipline qui cherche à enrichir la compréhension, l'efficacité et la beauté de nos mouvements et des environnements auxquels nos actions contribuent et dont ils tirent aussi leur énergie et leur signification. D'autre part, Motamedi (2007) considère que toucher l'œuvre contribue à renverser le rapport non corporel que nous pouvons traditionnellement avoir avec elle dans l'approche analytique et amener à en avoir une expérience esthétique.

#### d) Les interactions esthétiques

De cette nouvelle vague en IHM, un certain nombre de concepteurs d'interaction se sont penchés sur l'esthétique d'utilisation, suivant une vision pragmatique de l'esthétique Shusterman (2000) favorisant l'expérience corporelle de l'interaction. Effectivement, la vision pragmatique dépasse la vision analytique qui prône traditionnellement une esthétique de l'apparence (Petersen *et al.*, 2004). Elle se distingue de la vision analytique car elle prend en compte le contexte socio-culturel de l'utilisation (Motamedi, 2007, Petersen *et al.*, 2004) et insiste sur l'interdépendance de l'esprit et du corps, lors de l'expérience esthétique. Ce lien entre l'esthétique dans l'interaction et le corps ou le mouvement est défendu par Moen et Sandsjö (2005), Kjölberg (2004), Moen (2006).

Kjölberg (*ibid.*) va jusqu'à promouvoir la connaissance du corps et du mouvement chez les concepteurs d'interactions. Il s'appuie sur des études prouvant que l'introduction de théories du mouvement dans l'apprentissage de l'IHM développe certaines compétences requises pour la conception d'interactions esthétiques. En d'autres termes, la compréhension du mouvement et du corps, contribue à une vision esthétique de l'interaction.

En outre, la vision analytique place l'expérience de l'œuvre au-dessus ou en dehors de la vie quotidienne tandis que l'approche pragmatique tend à se rapprocher des besoins, des désirs, des peurs et des espoirs de l'individu (Wright *et al.*, 2008). Pour Wright et ses collègues (*ibid.*), l'esthétique pragmatique commence par l'attention à la relation entre l'utilisateur et le dispositif interactif. Elle ne concerne pas seulement le développement cognitif, mais aussi les aspects émotionnels de l'expérience. Ils considèrent que

l'esthétique pragmatique devrait être impliquée dans la façon de concevoir et d'évaluer l'interaction. Gaver *et al.* (2004b) vont jusqu'à avancer que l'esthétique devrait être au même niveau que les critères fonctionnels d'une interface, en mettant l'accent autant sur les critères de plaisir que sur l'efficacité ou l'ergonomie.

Signalons que le postmodernisme ne fait plus correspondre la valeur esthétique à la beauté. Ce que Lyotard suggère au contraire, c'est une esthétique du sublime qui « présente l'imprésentable ». Cette esthétique résume la différenciation marquant le postmodernisme en transcendant les catégories morales comme « ce sentiment est bon, ce sentiment est mauvais, ça sent bon, ça sent mauvais, ça a l'air bien, ça a l'air mauvais » (Lyotard, 1984). Reprenons une citation de John Cage concernant la musique qui illustre bien cette vision :

The writing of music is an affirmation of life, not an attempt to bring order out of chaos nor to suggest improvement in creation but simply a way of waking up to a to the very life we're living, which is so excellent once one gets one's mind and one's desire out of the way and let it act of its own accord (page 14, (Cage, 2011)).

Les conférences internationales *Tangible and Embodied Interactions* ou *Designing pleasurable products and interfaces* recèlent un nombre considérable d'exemples d'interactions esthétiques favorisant une expérience corporelle de l'interaction.

### e) Les interactions performatives

Comme nous l'avons discuté dans la section précédente, le spectacle vivant a connu une utilisation croissante des technologies numériques interactives depuis une cinquantaine d'années, formant ainsi le sous domaine de la performance numérique. Ces œuvres artistiques peuvent proposer des interactions complexes et riches, tout en s'affranchissant du cadre méthodologique de l'IHM. Par exemple, rares sont les performances numériques qui suivent des méthodes de conceptions ou d'évaluation issues de l'IHM. Elles s'appuient souvent sur les concepts artistique et technologique et les choix décidés en commun par le développeur et l'artiste.

Du fait d'utiliser des technologies, la performance en devient hybride et gagne à formaliser l'apport de ces technologies dans son expérience. Il convient alors de définir quels sont les formalismes de l'interaction adaptés au domaine du spectacle vivant. D'après Sheridan *et al.* (2007), « La nature même de l'utilisation de la technologie dans l'art contraste avec l'accent fort mis en IHM sur l'efficacité ». Cela a suscité dans la communauté IHM et particulièrement celle qui évolue dans la troisième vague dont il est question dans cette section, un besoin de formaliser des nouvelles méthodologies en dehors de celles traditionnellement élaborées, pour décrire l'acte

performatif. Ces nouvelles méthodologies « défient les obstacles de l'ergonomie et déjouent de manière créative les concepts de l'IHM » (England *et al.*, 2007).

Dans une perspective IHM, Dix *et al.* (2005) proposent une méthode qui permet de comprendre l'influence de l'interaction sur les acteurs et les spectateurs et ainsi que l'influence des acteurs et des spectateurs sur l'interaction. De plus, Reeves *et al.* (2005) présentent un cadre pour comprendre l'expérience qu'a le spectateur de l'interaction entre l'acteur et la technologie, dans les représentations publiques. Ils proposent une taxonomie où les interactions publiques sont classées selon si la manipulation de l'acteur et les effet résultant sont cachés, partiellement ou totalement révélés ou même amplifiés. Cela rejoint deux types d'interactions élaborées dans notre thèse pour la danse. D'une part, la relation (manipulation et effet) entre le danseur et l'artefact numérique dans l'installation *DS/DM*, décrite dans le chapitre 8, est réflexive (totalement révélée). D'autre part, la relation entre le danseur et l'artefact numérique dans la performance *Chisseling Bodies*, décrite dans l'annexe A, constitue un duo danseurs-visuels (partiellement révélée).

#### f) La danse dans l'interaction

Au-delà de ce que la communication Homme-Homme peut fournir comme informations sur les capacités humaines en jeu lors de l'interaction avec la machine, la nouvelle vague en IHM s'inspire de certains modes d'expression issus des domaines artistiques. La danse, en particulier a aussi inspiré des nouvelles orientations dans les interactions gestuelles impliquant le corps entier. Parmi les contributions les plus notables de cette hybridation danse-IHM, citons celles de (Schiphorst *et al.*, 1990, 1994) et celles de (Moen, 2006). Elles proposent de nouvelles perspectives issues de la danse pour le design d'interactions esthétiques qui permettent d'enrichir l'expérience utilisateur. L'étude de la danse dans les IHM est d'autant plus d'actualité depuis la commercialisation dans l'industrie du jeu vidéo, de la caméra infra-rouge Microsoft-Kinect<sup>19</sup> qui capitalise sur les avancées des interactions du corps entier (England *et al.*, 2010).

### 2.3 Problématiques liées au design de l'interaction

Concernant le design d'interaction de la troisième vague, la nouvelle question à laquelle se sont attelés les concepteurs et théoriciens de l'interaction est : « Qu'est ce qu'un bon design ? ». Pour Sheridan *et al.* (2007), l'introduction d'aspects alternatifs dans les dispositifs interactifs exige de nouvelles

19. Le site Internet de la Microsoft Kinect accédé le 28/10/2012 : <http://www.microsoft.com/en-us/kinectforwindows/>

compétences de conception, telles que des « compétences créatives » qui permettent d'avoir une compréhension sensible de l'utilisateur.

Une des méthodes connue de design de la troisième vague d'IHM est celle des sondes culturelles (ang. *cultural probes*) inventée par (Gaver *et al.*, 2004a). Cette approche a été développée au départ pour la conception d'interfaces « agréables » (ang. *pleasant*) et non utilitaires et s'est ensuite élargie à tout type d'interfaces où le concepteur a besoin de comprendre l'utilisateur de sorte à mettre en relief l'empathie pour l'utilisateur et l'engagement de l'utilisateur dans l'interaction. Les sondes sont des petits dispositifs tels que des caméras, des cartes postales, des cartes géographiques ou des enregistreurs, accompagnées de tâches suscitées permettant aux concepteurs de collecter des indices sur la vie, les réflexions et les pensées quotidiennes et personnelles des utilisateurs en contexte d'interaction. Ces « données » forment des bases d'inspiration dans la conception de dispositifs interactifs à des buts d'enrichissement du quotidien des utilisateurs.

Par ailleurs, les méthodes participatives, sont largement utilisées car elles ne considèrent plus l'utilisateur comme un sujet d'étude mais elles le font participer à la boucle de conception. Ces méthodes examinent les aspects de l'activité humaine dans le design de technologies et partent du postulat que ces aspects peuvent être étudiés à travers l'association et la coopération entre le concepteur et le participant. Elles doivent généralement être conduites itérativement de sorte que le concepteur et le participant puissent développer et raffiner leur compréhension de cette activité (O'Neill et Johnson, 2004, Spinuzzi, 2005). Enfin, elles reposent sur la connaissance tacite développée par l'utilisateur de la technologie et visent à lui permettre de déterminer sa propre façon d'accomplir une tâche. Leur objectif est de préserver cette connaissance tacite pour que la technologie s'adapte à l'utilisateur plutôt que d'exister en dehors. Mackay et ses collègues proposent des méthodes d'observation, brainstorming et de prototypage, basées sur l'analyse d'enregistrements vidéos, à des fins de conception participative (Mackay et Fayard, 1999, Mackay, 2000). Elles préconisent une analyse exploratoire des données vidéos issues de ces méthodes, souvent plus adaptée qu'une analyse statistique (Mackay et Davenport, 1989).

Inversement, on peut se poser la question suivante : « Comment adapter les approches de design d'IHM pour les activités créatives ? ». Parmi les méthodologies qui ont vu le jour, citons celles qui sont générales aux activités créatives (Coughlan et Johnson, 2009), spécifiques aux œuvres interactives multimodales (Jacucci *et al.*, 2009), spécifiques à la composition musicale (Garcia *et al.*, 2012), ou encore celles qui se focalisent sur des aspects affectifs liés à l'expérience du système interactif composant l'œuvre (Candy et Edmonds, 1997).



## 2.4 Problématiques liées à l'évaluation

Les aspects dont il est question dans la troisième vague d'interaction, contribuent à une vision subjective de l'ergonomie et de l'appréciation d'un dispositif interactif, liée plutôt à l'expérience personnelle de l'utilisateur de l'interaction. Selon (Stowell *et al.*, 2009), ces interactions impliquent souvent « des aspects créatifs et affectifs, ce qui signifie qu'elles ne peuvent pas être décrites en terme de tâches pour lesquelles les taux de réussite peuvent être mesurés de façon fiable ».

### 2.4.1 Evaluations spécifiques

Dans l'équipe de Bill Gaver, ils utilisent des méthodes d'observations ethnographiques et des entretiens pour recueillir de riches descriptions des activités des utilisateurs ainsi que de leurs opinions concernant le dispositif interactif. De plus, ces expérimentations sont documentées par des réalisateurs de films documentaires, des journalistes ou des écrivains de fiction afin d'en saisir les réflexions personnelles ainsi que les significations données par les utilisateurs.

Höök *et al.* (2003) ont développé un modèle d'évaluation à deux niveaux qui répond aux préoccupations liées aux œuvres artistiques interactives. Cette méthode s'intéresse à l'aspect affectif et est utilisée afin d'améliorer la conception d'une œuvre interactive. Elle permet d'analyser la façon dont l'interaction a été interprétée et son message artistique communiqué.

Enfin, pour la danse, Latulipe et ses collègues proposent une variété de méthode d'évaluation avec des mesures objectives et subjectives (Latulipe *et al.*, 2011b,a). Par exemple, pour évaluer l'engagement des spectateurs pendant un spectacle de danse augmentée, ils utilisent des données d'activité électro-dermale relatives à l'activation (ang. *arousal*) (Latulipe *et al.*, 2011b). Ils ont partagé leurs résultats avec des danseurs et chorégraphes pour comprendre l'interprétation par les artistes de l'attention des spectateurs malgré les limites des méthodes de type stimuli/réponses dans le cadre de l'expression artistique. Par ailleurs, Latulipe *et al.* (2011a) proposent aussi une méthode qualitative reposant sur des mesures subjectives de l'engagement et du plaisir du public qui assiste à une pièce de danse augmentée. Cette fois-ci, ils utilisent des méthodes de *focus group* avec les danseurs et comparent les réponses à des questionnaires suivant différentes conditions expérimentales correspondant à différents niveaux d'explicitation des contenus artistiques et technologiques de la pièce.

### 2.4.2 L'expérience utilisateur (UX)

Il semble que dans cette troisième vague, l'évaluation de l'expérience de utilisateur (ang. *User Experience* (UX)) soit au centre des préoccupations des concepteurs. Ce constat reflète l'intérêt croissant montré par les industriels, chercheurs et concepteurs d'interaction pour les aspects non utilitaires de l'interaction mis en évidence par l'UX (Hassenzahl, 2008, Law *et al.*, 2009, Roto *et al.*, 2009). Principalement axée sur l'utilisateur et son expérience subjective lors de l'interaction avec un système, l'UX révèle, entre autres, les comportements affectifs ou même l'appréciation esthétique suscités par le dispositif. Cependant, bien que déjà largement utilisé, ce concept souffre encore d'un manque de recherche expérimentale. De nombreuses définitions et points de vue sur l'UX coexistent sans donner lieu à un net consensus scientifique. Dans la présente thèse, nous utilisons l'UX dans certaines de nos évaluations. Pour cela, nous adoptons une des cinq définitions de l'UX, proposée dans l'enquête menée par (Law *et al.*, 2009) sur la compréhension de ce concept par les praticiens et les chercheurs en IHM qui l'utilisent. Cette définition, la plus pertinente pour notre travail, est celle traitant des affects et des émotions :

L'expérience utilisateur est l'ensemble des affects qui sont provoqués par l'interaction entre un utilisateur et un produit, y compris la mesure dans laquelle tous nos sens sont gratifiés (expérience esthétique), la signification que nous attachons à ce produit (expérience de signification), et les sentiments et émotions qu'il suscite (expérience émotionnelle) (Law *et al.*, 2009).

## 2.5 Synthèse

Dans la continuité des performances numériques qui lient les arts du spectacle, et en particulier la danse, et les technologies informatiques, nous nous plaçons dans une volonté d'étudier le geste dansé dans des dispositifs interactifs à destination de la pédagogie de la danse ou de la danse augmentée. Précisément, l'idée est de développer des interactions gestuelles du corps entier basées sur la notion de qualités de mouvement dansé. Cette perspective d'enrichissement des Interactions Homme-Machine nous place directement dans la nouvelle vague en IHM : nos dispositifs interactifs sont gestuels, corporalisés et concernent la plupart du temps le corps entier.

A ce niveau de la lecture du manuscrit, les questions qui doivent se poser et auxquelles nous tenterons de répondre dans le chapitre 3 sont donc : « Quelles sont les richesses du geste dansé ? » et « Comment définir, caractériser, analyser et représenter ses qualités de mouvement ? ».



## Chapitre 3

# Eléments de Qualités de Mouvement

La thèse étudie le geste dansé afin d'enrichir les IHM futures en proposant de nouveaux paradigmes d'interaction qui offrent à l'utilisateur de plus amples possibilités corporelles d'expression.

Les théoriciens et les praticiens de la danse considèrent comme vecteur d'expression dans le geste, la notion (bien connue en danse) de « qualités de mouvement ». Les qualités de mouvement sont une propriété fondamentale présente dans toute action humaine qui confère au geste une certaine coloration perçue. Malgré son importance, cette notion reste généralement corporalisée de façon inconsciente et peu verbalisée. Il y a peu d'articles en analyse du geste sur ce sujet et ils n'en donnent pas une définition unanime. Il existe peu de traces des qualités de mouvement ailleurs que dans la théorie de la danse et en psychologie. Et en IHM, cette caractéristique gestuelle n'a que très rarement été considérée.

Le chapitre qui suit rassemble des définitions existantes du geste ainsi que de la notion de qualités de mouvement dans l'objectif d'appréhender cette notion centrale à notre travail de recherche.

Tout d'abord, nous définissons le geste et en citons des taxonomies issues de l'étude de son lien à la parole. Nous faisons ensuite un détour par les sciences du mouvement et les études existantes (notamment computationnelles) des propriétés du système moteur.

Dans la deuxième partie de ce chapitre, nous orientons notre état de l'art vers la notion de qualités de mouvement dont nous présentons des définitions issues de l'expression corporelle. Nous verrons que certaines de ces notions ont aussi été étudiées en psychologie et en neurosciences. Par la suite, nous détaillerons quelques utilisations des qualités de mouvement issues de la théorie de l'analyse du mouvement de Rudolph Laban dans le domaine de l'IHM. Enfin, nous définirons l'ensemble du vocabulaire des

qualités de mouvement issu de l'atelier *Double Skin/Double Mind (DS/DM)* développé par la compagnie Emio Greco|PC, que nous utilisons dans une large mesure comme cas d'étude de nos travaux de thèse.

### 3.1 Généralités sur le geste

Les processus corporels non verbaux contribuent à la communication, en particulier des intentions ou des émotions. Ces processus opèrent au travers de différents canaux de communication tels que les expressions faciales, le regard, le geste, les postures, le contact (Argyle, 1988). Nous nous intéressons dans cette thèse au geste comme vecteur d'expression. Nous présentons, dans ce qui suit, un certain nombre d'éléments généraux sur le geste : définition, taxonomies et propriétés motrices.

#### 3.1.1 Le mouvement, l'action et le geste

Dans notre étude, ancrée dans un contexte lié à la danse, nous parlerons de *gestes* dansés et de leurs qualités de mouvement, et non d'*actions* ou de *mouvements* dansés. Nous pensons que ce terme est plus approprié afin de rendre compte de leurs caractères expressifs.

Vu des théories de la danse, le terme « geste » se distingue du mouvement suivant différentes propriétés. Selon Louppe,

Le geste a une intention, alors que le mouvement peut aussi bien résulter d'un automatisme humain que de n'importe quelle animation d'un objet ou d'un mécanisme non humain (page 106, Louppe (1997)).

Cela rejoint la vision de Kendon (2004) où le mouvement devient geste lorsqu'il participe à rendre les caractéristiques de l'expressivité manifeste et délibéré (ang. *features of manifest deliberate expressiveness*). Il désigne par ces caractéristiques, l'aspect entièrement et intentionnellement communicatif. De plus, le geste se distingue de l'action, selon Adam Kendon, par sa valeur sémantique et ses limites définies (un début et une fin) :

If an action is an excursion, if it has well defined boundaries of onset and offset, and if it has features which show that the movement is not made solely under the influence of gravity, then it is likely to be perceived as gestural. (page 14, (Kendon, 2004))

La définition du geste de Kurtenbach et Hulteen (1990) permet également de synthétiser les différents éléments que nous avons précédemment décrits :

A gesture is a motion of the body that contains information.  
Waving goodbye is a gesture. Pressing a key on a keyboard is not a gesture because the motion of a finger on its way to hitting the key

is neither observed nor significant. All that matters is which key was pressed.

Using your hand to show the motion of a falling leaf is a gesture. A teenager flailing at a video game joystick is not gesturing but rather is operating a controller that senses in which of eight possible directions a stick is being pushed.

Beckoning with your index finger is a gesture. Handwriting is not a gesture because the motion of the hand expresses nothing; it is only the resultant words that convey the information. The same words could have been typed – the hand motion would not be the same but the meaning conveyed would be.

Sign languages are made up of gestures.

Directing traffic is a gesture language.

### 3.1.2 Perspective fonctionnelle du geste

Nous présentons dans cette section, une approche fonctionnelle de l'analyse du geste à travers un certain nombre de travaux qui se sont attachés à en proposer des taxonomies. Ces taxonomies sont décrites ici, car elles représentent des références incontournables dans l'étude du geste. Cependant, comme nous le verrons, ces taxonomies ne nous permettent pas d'approcher de manière fine les notions de geste expressif, que nous aborderons par la suite au travers de l'étude des qualités de mouvement en danse.

Dans le contexte de travaux sur le geste musical, Cadoz (1994) apporte une distinction entre différents types de gestes suivant leurs fonctions dans l'environnement :

- Les gestes *ergotiques* sont liés aux actions matérielles et sont utilisés pour modifier et transformer l'environnement.
- Les gestes *épistémiques* sont liés à la perception de l'environnement. Ils sont utilisés pour l'exploration tactile ou haptique.
- Les gestes *sémiotiques* sont liés à la communication d'informations utiles, à travers l'environnement.

Notre étude du geste dansé est concernée par ses fonctions sémiotiques qui communiquent un contenu expressif mais potentiellement aussi par ses fonctions *ergotiques* qui dans le cas où un retour visuel interactif est affiché, transforment cet environnement visuel. Nous présentons plus en détail dans la suite de cette section, les propriétés du geste sémiotique qui a été particulièrement étudié dans les travaux sur le lien entre la parole et le geste.

Dans le contexte de l'étude du lien entre le geste et la parole, le geste *sémiotique* est divisé par Rimé et Schiaratura (1991) en différentes sous-catégories :

- Les gestes *iconiques* (ou *connotatifs* dans la taxonomie de Wundt (1973)) sont utilisés pour transmettre des informations sur la taille, la forme ou l'orientation de l'objet du discours. Ils décrivent un élément à partir de ses caractéristiques.
- Les gestes de *pantomime* sont des gestes d'*imitation* qui illustrent habituellement l'utilisation d'outils ou d'objets « invisibles » dans la main de l'orateur.
- Les gestes *déictiques* sont des gestes *démonstratifs*, tels que les gestes de pointage, ou de direction de l'attention des auditeurs à des événements spécifiques ou à des objets de l'environnement. Ce sont les gestes les plus souvent utilisés en IHM.
- Les gestes *symboliques* sont des gestes qui, dans chaque culture, en sont arrivés à avoir un sens unique. Un emblème tel que le geste « thumbs up » symbolisant « OK » avec le pouce, en est un exemple. Notez que certains gestes de la langue des signes peuvent entrer aussi dans cette catégorie.

À partir des précédents travaux, McNeill propose une taxonomie basée sur le lien du geste avec un référent imagé (McNeill, 2000, 1996) :

- Les gestes *imagés* qui se réfèrent à une *image* de nature quelconque, allant de la forme d'un objet à une action ou une activité.
  - Les gestes *iconiques* qui représentent un objet ou une action concrète.
  - Les gestes *métaphoriques* qui représentent une image qui se réfère à une idée abstraite (ces gestes sont à mettre en lien avec les gestes *symboliques* proposés dans la taxonomie précédente).
- Les gestes *non-imagés* qui peuvent être divisés en deux catégories :
  - Les gestes *déictiques* qui désignent un objet ou quelqu'un du doigt.
  - Les gestes de *pulsation* ou *battements* qui ne portent pas de sens mais qui marquent les segments et le rythme de la parole.
- Les *emblèmes* : ce sont des signes comme bouger la main pour dire au revoir (ces gestes sont aussi à mettre en lien avec les gestes *symboliques*).

La catégorisation de McNeill a été appuyée par Kendon qui suggère que le geste peut aller du complément à la substitution de la parole (Kendon, 1988, 2004). Ce lien entre le geste et la parole décrit le célèbre continuum de Kendon.

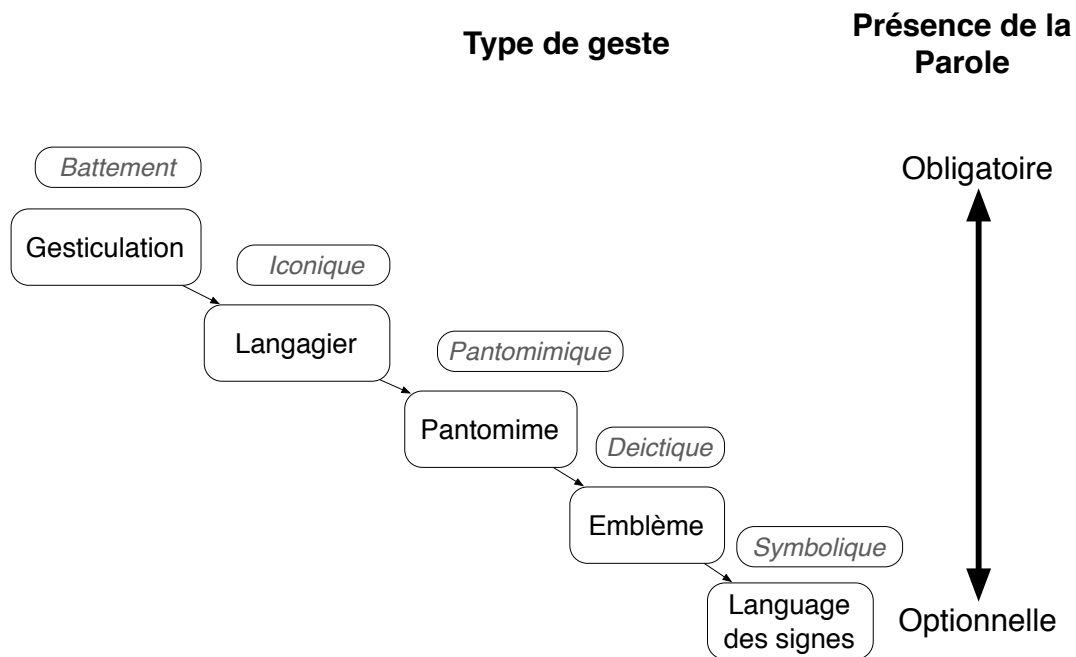


FIGURE 3.1 – Le continuum de Kendon

### 3.1.3 Théories motrices

Afin de nourrir la réflexion sur le geste, nous citons dans cette section un ensemble de travaux sur les lois du mouvement qui ont été mises en évidence. La littérature recèle plusieurs modèles, notamment computationnels, de la théorie motrice (Wolpert et Ghahramani, 2000, Gibet, 2009). Nous complétons notre vue d'ensemble des différentes approches de l'étude du geste en citant, dans cette section des travaux qui se réfèrent plus spécifiquement à des lois du mouvement liées aux aspects dynamiques du geste.

Des travaux de recherche ont permis de définir des lois générales reposant sur des invariants spatio-temporels de la motricité. Par exemple, le principe d'isochronie (Freeman, 1914) qui date du début du 20<sup>ème</sup> siècle, établit l'invariance de la durée d'exécution du mouvement en fonction de son amplitude. Une autre loi, extrêmement utilisée en IHM pour modéliser notamment l'action de pointage (Guiard *et al.*, 1999), dans la conception et l'évaluation de dispositifs d'entrée (MacKenzie, 1992), est la loi de Fitts (Fitts, 1954). Elle prédit le temps requis pour aller rapidement d'une cible à une autre, en fonction de la distance à la cible et de la taille de la cible.

Des travaux ont aussi révélé que la forme des profils de vitesse pour des mouvements de pointage est approximativement celle d'une gaussienne avec une certaine relation entre la vitesse et l'asymétrie de la gaussienne



(Gibet et Marteau, 1992, Gibet *et al.*, 2004). De plus, Viviani et Flash (1995) ont établi la fameuse loi « puissance deux-tiers » qui formalise, pour une certaine classe de mouvements, le lien observé entre la vitesse angulaire et la courbure du point extrémité : plus la courbure est grande, plus le mouvement est ralenti. La loi puissance deux-tiers a été par la suite reformulée par Viviani et al. (*ibid.*) pour établir le lien entre le rayon de la courbure et la vitesse tangentielle de n'importe quel point le long de la trajectoire, en couvrant une classe de mouvements plus large.

Les travaux de recherche de Viviani et Flash ont permis d'explorer la relation entre les aspects géométriques et cinématiques d'un mouvement. Ces modèles établissent que le mouvement de pointage d'une cible à une autre minimise une fonction de coût relative à certaines contraintes. Un exemple de fonction coût est le minimum de secousses (ang. *jerk*) proportionnelle à l'intégrale du carré moyen de la dérivée de l'accélération (Flash et Hogan, 1985, Viviani et Flash, 1995). Notez que les méthodes de minimisation de secousses sont bien adaptées pour la planification motrice (Bryson, 1975). Par ailleurs, d'autres fonctions de coût ont été étudiées telles que celle de Nelson (1983), dont la minimisation conduit à un profil de vitesse propre et caractéristique. L'application de ces fonctions de coût au geste musical a montré des résultats prometteurs pour la description de modes de jeu du violon (Rasamimanana et Bevilacqua, 2008, Rasamimanana, 2008). Ces modes de jeu sont assimilés par Chi *et al.* (2000) à des qualités de mouvement. Précisément, Chi et ses collègues comparent ces entités dynamiques qui ont été étudiées en informatique musicale telles que *legato*, *forte* ou *dolce* aux qualités de d'effort de Laban (1994) décrites dans la section 3.2.2.

## 3.2 Qualités de mouvement dans l'expression corporelle

Dans la danse, le geste est souvent décrit selon ses caractéristiques qualitatives. Les praticiens et théoriciens de la danse parlent de « qualités de mouvement ». Ces caractéristiques gestuelles jouent un rôle fondamental dans la pratique de la danse moderne et contemporaine. Effectivement, l'apprentissage de la danse moderne et contemporaine consiste à donner forme à une palette nuancée de gestes en « jouant » sur leurs qualités de mouvement. Cette section présente un ensemble de définitions de la notion de qualités de mouvement ou de notions connexes telles que l'intention, le pré-mouvement ou le style.

### 3.2.1 L'analyse du mouvement de Laban (LMA)

Les qualités de mouvement comme expression corporelle ont été largement étudiées dans les domaines relatifs à la danse ou à l'étude du mouvement. La figure de proue de l'étude du mouvement dansé est le chorégraphe, danseur, pédagogue et théoricien de la danse, Rudolph Laban.

Laban a élaboré une analyse du mouvement connue sous le nom de Laban Movement Analysis (LMA) qui a été appliquée depuis dans d'autres contextes que la danse, tels que le travail en usine, le développement de la petite enfance, l'athlétisme ou la thérapie par le mouvement (Laban, 1963). Il a ensuite approfondi son analyse du mouvement en élaborant une théorie de l'effort que nous présenterons à la suite de ce paragraphe (Laban, 1994). Mais Laban est surtout connu pour avoir développé une notation du mouvement, la *cinétopographie (kinetography)*, appelé aussi Labanotation au Royaume-Uni et aux États-Unis, où il propose un système de notation pour les mouvements dansés primaires. Cependant, les problématiques de codification du geste par Labanotation n'entrent pas dans le cadre de notre travail de recherche. Nous nous intéressons plus aux théories d'analyse du mouvement et de l'effort développées par Laban qui permettent de formaliser la notion de qualités de mouvement.

Les théories de Laban étudient le corps « en mouvement » au travers d'une géographie de relations qui s'élaborent à partir de l'intention. Il part du postulat que les actions corporelles sont des modifications de positions du corps ou de ses parties, nécessitant du temps, se produisant dans l'espace et utilisant de la force. Son analyse du mouvement par LMA comprend quatre grandes catégories permettant de décrire le mouvement en termes de :

- Corps : Qu'est ce qui est en mouvement ? Quel mouvement est produit ? Laban analyse les caractéristiques physiques du corps en déplacement.
- Espace : Dans quel espace s'inscrit le mouvement ? Laban (2003) définit la *kinésphère* comme un espace imaginaire personnel placé autour de la personne et accessible directement par ses membres, jusqu'à l'extrémité des doigts et des pieds tendus dans toutes les directions.
- Forme : Comment le corps change-t-il de forme pendant le mouvement ? Laban considère que les changements de forme peuvent être statiques (des changements de postures) ou dynamiques. Laban définit ainsi la notion de qualité de la forme, comme la façon dont le corps est activement en évolution d'un point à autre de l'espace. En plus de la notion d'effort, la qualité de la forme est un aspect qui agit principalement sur la qualité perçue du mouvement.
- Effort ou dynamique : Cette notion a été plus largement développée chez Laban en une théorie appelée « la théorie de l'effort ». Pour Laban l'effort

est la fonction intérieure produisant le mouvement. L'effort est ce qui se manifeste dans le mouvement (visible) et ce qui permet cette manifestation (invisible). La notion d'effort de Laban sera développée plus en détail dans le paragraphe qui suit.

### 3.2.2 La théorie de l'effort de Laban

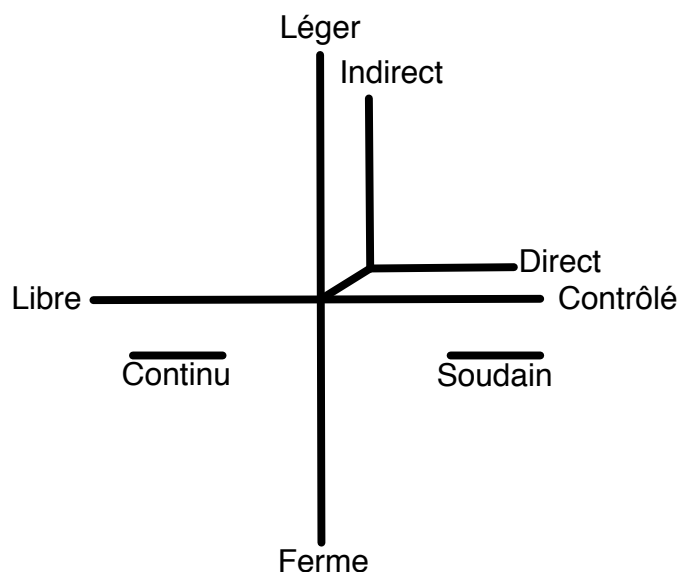


FIGURE 3.2 – Le graphe d'efforts de Rudolph Laban.

La figure 3.2 illustre les quatre dimensions définies dans la théorie de l'effort Laban et leurs deux polarités (Laban, 1994). Les constituants de ces quatre dimensions de l'effort ou ce que Louppe appelle les « qualités d'effort » résultent d'une attitude intérieure (consciente ou inconsciente) envers les quatre facteurs moteurs d'espace, de temps, de flux et de poids (Louppe, 1997, Louppe *et al.*, 1991). Ainsi, selon la théorie de l'effort de Laban, tout mouvement peut être décrit en termes d'effort sur ces quatre dimensions entre le « libre » et le « contrôlé », le « soudain » et le « continu », le « léger », et le « ferme » et l'« indirect » et le « direct ».

Les quatre facteurs de la théorie de l'effort n'ont pas d'existences séparées, ils sont liés les uns aux autres. Ainsi, le mouvement du corps peut faire varier un ou deux facteurs, sur une palette infinie de mutations et de modulations permises par « les états de corps ». Les états de corps selon Louppe (*ibid.*), « convoquent les lumières intérieures, que le mouvement va chercher au creux du sensible pour révéler d'innombrables reflets ». Ce sont ces reflets perçus dans le mouvement, que l'on qualifie de qualités de mouvement.

1. **L'espace du mouvement** : Les variations d'efforts en termes d'espace produisent des mouvements qui se situent entre le « direct » (« flexible ») et l'« indirect » (« rectiligne »).
2. **Le temps du mouvement** : Les variations d'efforts en termes de temps produisent des mouvements qui se situent entre le « soudain » et le « continu ». Certains chorégraphes comme Merce Cunningham ont particulièrement développé cette dimension comme facteur poétique, matière chorégraphique et propos artistique à part entière.
3. **Le flux du mouvement** : Les variations d'efforts en termes de flux produisent des mouvements entre le « libre » et le « contrôlé ». Le flux représente l'intensité du tonus musculaire et caractérise la qualité d'écoulement du mouvement et le degré de libération produit dans le mouvement. C'est selon Louppe (1997) un agent « qualitatif susceptible de colorer, d'activer et de vivifier la menée d'une expérience du geste ».
4. **Le poids du mouvement** : Les variations d'efforts en termes de poids produisent des mouvements qui se situent entre le « ferme » et le « léger ». Le poids est un des principes fondateurs de la danse moderne et contemporaine car tout mouvement y est défini par le transfert de poids. Les trois autres facteurs de la théorie de l'effort servent à colorier différemment cette sensation de poids. Selon Louppe (ibid.) :

L'importance du poids est une des grandes découvertes de la danse contemporaine : non seulement le poids comme facteur de mouvement selon une vision qui resterait plate-ment biomécanique, mais le poids comme enjeu poétique primordial (page 97, (Louppe, 1997)).

#### a) La « dynamosphère » de Laban

Dans son livre *La maîtrise du mouvement*, Laban (1994) définit huit actions élémentaires d'effort représentant une suite de combinaisons du poids, du temp, et de l'espace. Ce sont les huit actions dynamiques de base : frapper, flotter, fouetter, glisser, presser, tordre, épousseter et tapoter, qui forment un ensemble dit « dynamosphère ». Ainsi, le terme dynamosphère a été inventé par Laban pour illustrer la structure imaginaire qui illustre ces huit efforts de base, schématisée dans le cube représenté par la figure 3.3.

#### 3.2.3 Le « pré-movement »

La notion de « pré-movement » a intéressé des théoriciens de la danse tels que Godard car elle permet d'appréhender les prémisses du geste. Dans la postface *Le geste et sa perception* de l'ouvrage *La danse au XX<sup>ème</sup> siècle*, Godard (1995) estime que

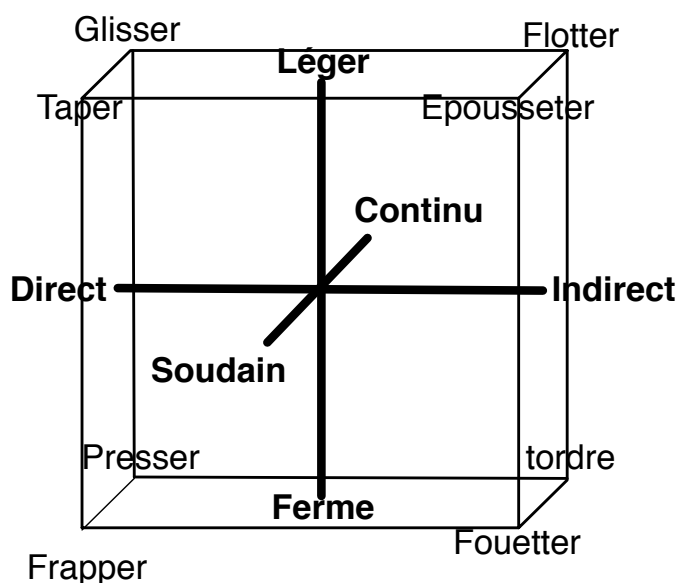


FIGURE 3.3 – La dynamosphère de Laban : Huit actions dynamiques de base.

*La posture érigée*, au-delà du problème mécanique de la locomotion, contient déjà des éléments psychologiques, expressifs, avant même toute intentionnalité de mouvement ou d'expression. Le rapport avec le poids, c'est-à-dire avec la gravité, contient déjà une humeur, un projet sur le monde (page 236, (Godard, 1995)).

Il appelle le pré-mouvement l'attitude envers le poids, la gravité qui précède le mouvement, qui existe déjà dans le seul fait d'être debout, et qui va produire la charge expressive du mouvement que nous allons exécuter. Ainsi selon Hubert Godard (ibid.), chaque danseur, selon son état affectif, interprétera un geste avec une différente « musicalité posturale » ou qualité. C'est le pré-mouvement qui modifie profondément la qualité du geste et colore ses nuances. Pour Godard, améliorer, modifier, ou diversifier ses qualités de mouvement requiert d'un danseur de maîtriser toutes les dimensions du mouvement, y compris celles du pré-mouvement.

Le pré-mouvement fait d'ailleurs écho aux notions d'anticipation du mouvement (ou de contrôle du mouvement) dans le domaine des neurosciences (Berthoz, 2008). D'après Berthoz, avant d'empoigner un objet sur le plancher, il y a une synergie automatique, une flexion (un pré-mouvement puis une intention) qui pousse légèrement le corps vers l'arrière. Ainsi le pré-mouvement signifie ici la préparation à l'exécution du mouvement qui se produit avant l'observation d'une action. Notons que pour capter le pré-

mouvement, des mesures de paramètres physiologiques semblent être les mieux adaptées. Certains mécanismes mesurables tels que l'activation des muscles, le rythme cardiaque, ou des signaux du cerveau, peuvent être sensibles au pré-mouvement, même s'il n'y a pas de mouvement significatif visible.

### 3.2.4 Le style

La notion de qualités de mouvement est souvent associée à la notion de « style ». En danse, le style d'un mouvement résulte de variations individuelles qui peuvent laisser apparaître des options de « qualités » et permettre de mettre en évidence un aspect particulier de l'expression corporelle. Cependant, ces deux notions ne se placent pas au même niveau. Car le style, contrairement aux qualités, est le propre des actions d'un individu. L'individu exploite les possibilités stylistiques que lui offre par exemple son corps, son histoire, son émotion ou son humeur, les développe et leur donne un sens et une portée (Louppe, 1997). Le style confère donc à une danse une identité culturelle et un caractère distinctif en rejetant certaines des possibilités structurelles du mouvement. Ainsi, on peut parler du style de tel chorégraphe ou de tel danseur, mais on ne peut considérer qu'une qualité de mouvement est le propre d'un individu.

### 3.2.5 Le contenu expressif des qualités de mouvement

Une grande partie des gestes dansés (contrairement à la plupart des gestes du quotidien) n'ont pas de cibles ou d'objectifs autres que de transmettre intentionnellement et explicitement ou implicitement certains types d'informations à contenu expressif, indépendant d'une signification explicite en référence à l'environnement où ils sont réalisés et aux objets ou individus qui s'y trouvent. De tels gestes ne désignent ou n'attrapent pas d'objet et ne soutiennent pas le langage. Les informations contenues dans ce type de gestes dansés (qui représentent surtout une grande partie des gestes de la danse moderne et contemporaine) sont du domaine de l'affectif, du poétique ou du narratif. Ce sont de tels gestes dansés que nous étudions dans la présente thèse. En particulier, ce sont leurs variations de connotation (leurs particularités liées au contexte, à la culture, au subjectif, à l'implicite) qui nous intéressent. Nous parlerons d'ailleurs de « gestes dansés » puisqu'il s'agit « de mouvements du corps qui contiennent de l'information » (suivant la définition de Kurtenbach et Hulteen (1990)). Ils sont de nature « expressive » car ils portent ce que (Cowie *et al.*, 2001) appellent des « messages implicites », et ce que (Hashimoto, 1997) appelle le Kansei.

### 3.2.6 L'émotion

Un état émotionnel ou affectif est un état interne chez l'individu qui ne peut pas être directement observé par autrui. Selon Picard (1995), l'être humain révèle des expressions émotionnelles ou des « symptômes », au travers du système moteur (des mouvements et de leurs qualités), des expressions faciales ou de la voix. Ces symptômes aident autrui à deviner un état émotionnel. Autrement dit, comme les symptômes des émotions, les qualités de mouvement opèrent dans le monde physique du geste. Les qualités de mouvement ne permettent d'inférer les émotions d'un individu que si nous disposons d'un modèle d'association entre caractéristiques gestuelles et émotions. Les travaux de Wallbott (1998) en psychologie, ont d'ailleurs contribué à élaborer une association entre les émotions et les qualités de mouvement. Wallbott définit trois dimensions de qualités de mouvement qui caractérisent significativement les émotions :

- **l'activité du mouvement**, à savoir la quantité globale du mouvement, liée à sa vitesse ;
- **l'expansion ou l'extension spatiale** ;
- **la dynamique de mouvement, son énergie, ou sa puissance**.

Dans le but de créer un agent virtuel expressif capable d'afficher des signaux de communication et des signaux émotionnels, Pelachaud (2009) a développé un « modèle d'expressivité » qui se base sur les dimensions de qualités de mouvement de Wallbott (ibid.) ainsi que les « dimensions de style » de Gallaher (1992) (« l'expressivité », « l'animation », « la coordination » et « l'expansivité »). Ce modèle d'expressivité permet de modifier le geste en modulant ses qualités de mouvement. Il définit six « dimensions d'expressivité gestuelle » qui influencent les qualités du mouvement de l'agent virtuel (la combinaison des dimensions crée des gestes avec différentes qualités) :

- **L'extension spatiale** : La quantité d'espace occupée par une partie du corps (cette dimension est en lien avec la dimension d'« expansion ou extension spatiale » définie par Wallbott et avec la dimension d'« expansivité » définie par Gallaher (ibid.)).
- **L'extension temporelle** : La vitesse d'exécution d'un mouvement (cette dimension est en lien avec la dimension d'« animation » de Gallaher).
- **La fluidité** : Le niveau de la continuité du mouvement qui se situe entre le « saccadé » et le « lisse » (cette dimension est en lien avec la dimension de « coordination » de Gallaher).
- **La puissance** : Le dynamisme du mouvement qui se situe entre le « faible » et le « fort » (cette dimension correspond à la dimension de « dynamique du mouvement/énergie/puissance » de Wallbott).
- **L'activation globale** : La quantité globale de mouvement (cette dimension est en lien avec la dimension d'« expressivité » définie par Gallaher).

- **La répétition** : Cette dimension correspond à la qualité rythmique et répétitive d'un mouvement qui permet par exemple de marquer une emphase.

Pelachaud (2005) a conduit deux tests perceptifs du modèle d'expressivité. Le premier test a évalué l'association des sujets de chaque paramètre expressif avec le comportement correspondant de l'agent virtuel. Le deuxième test a permis de valider l'association entre trois qualités de mouvement labellisées (« brusque », « mou » et « tonique ») et les comportements de l'agent résultant de la combinaison des paramètres d'expressivité correspondants.

L'application du modèle d'expressivité de Pelachaud (ibid.) a montré que l'expressivité gestuelle pouvait agir à différents niveaux du geste (la phase ou la séquence gestuelle ou le geste entier) et avoir différentes fonctions dans le contexte discursif comme par exemple attirer l'attention, persuader l'interlocuteur ou indiquer des états émotionnels. Enfin, elle a permis de souligner l'importance des qualités de mouvement en montrant que deux gestes identiques pouvaient véhiculer des significations très différentes selon leurs qualités (Pelachaud, 2009).

Le lien entre qualités de mouvement et émotions apparaît aussi dans les travaux de thèse de Volpe (2003) où il considère que les qualités d'un mouvement contribuent à caractériser un contenu gestuel expressif. Il prend l'exemple de la marche qui peut être effectuée de plusieurs manières, en insistant sur les différentes qualités de marche. Selon lui, cela permet de reconnaître une personne à partir de sa façon de marcher et/ou de révéler son état émotionnel. Effectivement, les qualités de mouvement permettent de transmettre une information sur la nature « subjective » du geste au-delà des considérations purement biomécaniques. Volpe (ibid.) distingue alors plusieurs objectifs et couches d'analyse formelle : une première couche vise à décrire les caractéristiques physiques du mouvement afin de le classer. Une seconde vise à extraire le contenu expressif de la marche, par exemple, en termes d'information sur l'état émotionnel de l'individu. Ainsi, Volpe considère la marche comme un geste expressif, car elle communique des informations sur l'état émotionnel du marcheur.

Néanmoins, notre travail de thèse ne traite pas du potentiel des qualités de mouvement à révéler les états émotionnels ou des associations possibles entre des qualités de mouvement et des catégories émotionnelles. Cela serait certainement une des perspectives intéressantes à poursuivre dans le domaine de l'*affective computing* ou de la psychologie à partir de nos contributions en analyse computationnelle de qualités de mouvement.



### 3.3 Utilisation dans des contextes thérapeutiques

La notion de qualité de mouvement a été utilisée dans des contextes thérapeutiques tels que la danse-thérapie et la psychologie.

#### 3.3.1 La théorie de Bartenieff pour la danse-thérapie

Irmgard Bartenieff (1890-1981), fondatrice de l'Institut Laban/Bartenieff d'études du mouvement a appliqué sa formation Laban dans le domaine de la thérapie physique et a développé sa propre approche du corps pour la rééducation (Bartenieff, 1972, Bartenieff et Lewis, 1980). Elle a été également danseuse, chorégraphe, experte en notation Laban et pionnière dans le développement de la danse-thérapie. Les observations des mouvements de patients en danse-thérapie de Bartenieff (*ibid.*), montrèrent que chez les schizophrènes, les facteurs moteurs sont atrophiés car leurs mouvements sont segmentés, sans construction et manquent de relation à l'espace. Cette atrophie affecte d'ailleurs les rapports avec l'espace, le temps, la variation de l'intensité énergétique et le poids du corps. Et cela entraînerait une « surdité » corporelle qui rendrait le patient imperméable à la musique et insensible à la danse.

En outre, l'approche de Bartenieff complète la théorie de Laban et décrit le mouvement en termes de soutien au souffle et de centre de masse ou transfert de poids. Ces aspects sont particulièrement intéressants au vu des applications présentées dans ce document et en particulier celles menées en collaboration avec la compagnie de danse contemporaine Emio Greco|PC (EG|PC).

#### 3.3.2 Les qualités de mouvement en psychologie

Outre les approches de Bartenieff établissant des liens entre des caractéristiques motrices (notamment issues de la théorie de Laban) et des troubles psycho-pathologiques, certains psychologues utilisent directement les concepts liés aux qualités de mouvement dans leur théorie (Wallbott, 1998, Hietanen *et al.*, 2004). En psychologie (en dehors du contexte de la danse), les qualités de mouvement sont définies comme la façon dont l'être humain exécute ses mouvements dans le temps et dans l'espace. Les qualités de mouvement sont mentionnées dans la littérature psychiatrique comme un aspect important des diagnostics de troubles psycho-pathologiques (Wallbott, 1998). Par exemple, les qualités des mouvements des patients schizophrènes sont habituellement décrites comme « angulaires, saccadées, et non coordonnées, inégales, avec une accélération et décélération, soit trop lentes ou trop rapides » (Hietanen *et al.*, 2004). Les troubles psycho-pathologiques sont associés aux qualités de mouvement « perturbées, brusques, arrêtées et guindées ». La terminologie employée en psychologie se

réfère surtout à des caractéristiques cinématiques et dynamiques du mouvement et à la façon dont il évolue au point de vue du contrôle moteur.

### 3.4 La théorie de l'effort utilisée en IHM

A notre connaissance, il n'existe pas dans le domaine de l'Interaction Homme-Machine (IHM), des travaux qui proposent des interactions basées stricto sensu sur la notion de qualités de mouvement telle que définie dans ce manuscrit. Néanmoins, nous décrivons dans cette section certains travaux remarquables en IHM qui mettent en œuvre le formalisme de Laban pour modéliser les huit actions dynamiques de la théorie de l'effort de Laban, ou des caractéristiques du geste issues de l'analyse du mouvement de (Laban, 1994) au sein de leurs systèmes interactifs. Par exemple, Woo *et al.* (2011) proposent une interface basée sur la vision 3D, qui extrait du mouvement de l'utilisateur des caractéristiques inspirées de l'analyse du mouvement de Laban. Cela a pour but de rapprocher les interactions Homme-Machine des interactions Homme-Homme en permettant une interaction plus expressive avec la machine. Moen (2007) a étudié la théorie de Laban, pour la conception d'interactions basées sur le mouvement. Sa motivation première était que la danse moderne ou contemporaine fournit un vocabulaire riche pour décrire le mouvement. La deuxième motivation était la nature idiosyncratique de la danse, ce qui signifie qu'elle encourage l'expression du style et des préférences personnelles. Enfin, la dernière motivation de Moen (*ibid.*) est que la danse se préoccupe de l'essence du mouvement (*ibid.*).

Schiphorst (2009) propose de relier l'utilisation des actions élémentaires de la dynamosphère de Laban avec la cognition corporalisée (ang. *embodied*) et l'expérience corporelle de l'esthétique dans les installations numériques. Son objectif est d'exploiter les caractéristiques issues de l'analyse du mouvement de Laban de façon à impliquer le corps de l'utilisateur dans l'expérience de l'interaction avec les médias numériques. Les travaux de Hashim *et al.* (2009) présentent un cadre qui donne des orientations pour la recherche et le design d'IHM avec ce qu'ils appellent des « interactions gracieuses ». Ils proposent un modèle basé sur l'analyse du mouvement de Laban comme fondement théorique principal de la conception d'interactions qu'ils appellent « gracieuses ». Enfin Kjölberg (2004) suggère que donner une telle théorie aux concepteurs d'interaction, conduit à la création d'interactions qui laissent place à l'expression corporelle.

### 3.5 Etude de cas : vocabulaire gestuel de DS/DM

Le choix du vocabulaire gestuel utilisé en grande partie dans cette thèse est motivé par une longue collaboration avec la compagnie de danse Emio Greco|PC (EG|PC). Au cours de cette thèse, nous avons participé au projet *Inside Movement Knowledge (IMK)* initié par la compagnie pour explorer les différents moyens de documenter la danse (Bermudez, 2009, Bermudez et Fernandes, 2010). Diverses disciplines telles que la linguistique (élaboration de glossaire), les notations de la danse (Laban et Benesh), la captation du mouvement, la synthèse sonore et graphique et les algorithmes de reconnaissance automatique du geste, ont été impliqués dans le projet IMK afin de documenter le vocabulaire de danse de la compagnie avec leurs propres outils. La compagnie EG|PC a élaboré un glossaire complet et détaillé définissant et décrivant qualitativement son vocabulaire. Plutôt que de se baser sur un glossaire général comme celui issu de la théorie de l'effort de Laban et ses quatre dimensions, nous avons pris le parti d'étudier les qualités de mouvement issues du glossaire d'EG|PC dans notre travail de recherche.

De plus, la compagnie et les professeurs de danse de l'école d'art d'Amsterdam ont exprimé un très grand intérêt pour le développement informatique d'une installation mettant en jeu ces qualités de mouvement, installation qui est désormais incluse de façon permanente dans le cursus d'apprentissage de la danse à l'école d'Art d'Amsterdam.

#### 3.5.1 L'atelier Double Skin/Double Mind



FIGURE 3.4 – L'environnement interactif de l'installation DS/DM

La compagnie EG|PC a développé l'atelier *Double Skin/Double Mind (DS/DM)* depuis 1996 pour former des danseurs à l'essentiel du vocabulaire de la compagnie. Au fil des ans, cet atelier a servi de base quotidienne pour EG|PC pour la transmission de ses principes. Cet atelier prodigue des enseignements sur le mouvement à travers des mots spécifiques, des sons et des consignes orales. L'installation *DS/DM* est une version interactive de l'atelier *DS/DM*. Comme l'illustre la figure 3.4, l'installation comprend un écran principal, trois écrans auxiliaires, une caméra infra-rouge et quatre hauts parleurs.

L'installation a été développée avec deux niveaux d'utilisation. Le premier niveau, appelé « demo level », s'adresse à des non-danseurs, comme une introduction aux concepts de l'atelier *DS/DM*. Le second niveau, appelé « professional level », s'adresse à des danseurs, étudiants ou professionnels. Ce deuxième niveau offre un environnement d'apprentissage qui permet une compréhension plus en profondeur de l'atelier *DS/DM* (DeLahunta, 2007, Bermudez, 2009). L'utilisateur est invité à danser dans l'espace de l'installation, et différents outils lui sont fournis, tels que des vidéos explicatives et démonstratives, des icônes, des instructions textuelles, ainsi que des retours interactifs visuels et sonores. Nous avons contribué au « professional level » en développant des visuels par modèles physiques décrits dans la section 5.5 de ce manuscrit, qui interagissent en temps réel avec les qualités de mouvement du danseur. Pour cela nous avons mis en place une méthode de reconnaissance de qualités de mouvement décrite dans la section 4.4 de ce manuscrit, qui a aussi été utilisée pour le contrôle en temps réel du son, des icônes et des instructions textuelles. Il s'agissait de dépasser les limites évidentes du retour visuel de la toute première version de l'installation qui était basée uniquement sur la silhouette et sur la boîte englobante (utilisée dans le « demo level » et visible dans la figure 3.4). Les éléments de l'installation relatifs aux vidéos explicatives et démonstratives, aux icônes, aux instructions textuelles et au retour sonore ne seront pas détaillés dans notre manuscrit.

#### a) Généralités sur l'atelier DS/DM

Tout d'abord, Emio Greco articule son atelier *DS/DM* en quatre composants principaux appelés *breathing*, *jumping*, *expanding* et *reducing*. Chacun de ces composants est lié à différentes qualités de mouvement et à des intentions spécifiques. Le chorégraphe transmet ces éléments aux danseurs à l'aide de métaphores sur l'intention intérieure et sur l'environnement extérieur. Le paragraphe suivant est un exemple de la façon dont Emio Greco explique le *reducing* verbalement pendant l'atelier :

*A partir de maintenant, vous pensez que votre corps commence à réduire sa longueur, vous commencez à penser que l'air autour de vous*

*devient de plus en plus épais, donc vous avez plus de résistance lorsque vous voulez ouvrir et étirer votre corps. Cela provoque la réduction de la longueur du mouvement. [...] Réduire encore plus, l'idée de l'air épais devient très concrète, la conséquence de ceci est que la forme de votre corps est déterminée par le transfert d'équilibre à l'intérieur et en même temps par la résistance à l'air extérieur, l'air est de plus en plus épais, cela rend le mouvement de plus en plus petit, plus petit, plus petit... et arrêtez et relâchez.*

Pour Bermudez (2009) « ce processus de communication, qui a lieu au moyen de la communication verbale et non verbale, intègre les informations essentielles nécessaires pour comprendre le travail de l'artiste ».

Le glossaire fait par Bermudez et Fernandes (2010), et contenant des définitions, des mots-clés, des descriptions des qualités et des relations entre les différentes parties du corps, est le résultat de l'analyse de la transmission orale lors des différentes sections de l'atelier. Ce glossaire qualitatif a servi de point de départ pour une large partie de notre travail de thèse. Les descriptions nous ont permis de définir des paramètres de mouvement pouvant être utilisés dans un système de reconnaissance et dans une visualisation des qualités de mouvement au sein de l'installation *DS/DM*. Les sections suivantes résument le glossaire de Bermudez et Fernandes (2010) pour les quatre principaux composants de l'atelier *DS/DM*. Des vidéos des quatre composants de *DS/DM* exécutés par Emio Greco sont disponibles sur internet<sup>1</sup>. Nous tenons à souligner que ces composants ne doivent pas être compris comme des mouvements simples, mais comme incarnant des « intentions intérieures ». Ces composants sont donc intrinsèquement liés à des qualités de mouvement particulières que nous détaillons ci-dessous :

### **b) Breathing**

Au cours de l'inspiration, le danseur s'étend progressivement à la verticale en atteignant la longueur maximale du corps grâce au souffle. Au cours de l'expiration, il libère le corps et revient à la position de départ. La figure 3.5 représente Emio Greco exécutant les deux parties du *breathing*, l'inspiration et l'expiration. Ce composant s'articule en trois nuances : le *growing*, la *ramification* et l'*exploration*.

Le *growing* est l'incarnation de l'action de la respiration par une augmentation progressive de la longueur verticale et l'extension de l'ensemble du corps.

La *ramification* est une respiration verticale intérieure et extérieure où les bras se ramifient dans les différentes directions possibles.

L'*exploration* est une ramification amplifiée des bras dans les directions de

1. Les 4 composants de *DS/DM* :  
<http://sarah.alaoui.free.fr/EGPCvideo>

FIGURE 3.5 – Emio Greco exécutant le *breathing*.

la kinesphère (voir la section 3.2.1 pour une définition de la kinesphère) et une potentielle torsion du corps pour l'amener à différentes positions dans l'espace.

c) **Jumping**

FIGURE 3.6 – Emio Greco exécutant le *jumping*.

Pendant le *jumping*, le danseur relâche le poids du corps jusqu'aux pieds en le laissant rebondir pendant une longue période et en créant ainsi un mou-

vement de rebond répétitif. Selon Emio Greco, le jumping incarne la métaphore de « la sensation du corps mou ». La figure 3.6 représente Emio Greco qui exécute un jumping. Ce composant s'articule en différentes nuances : le *gentle rebounding*, le *shoulder breathing* et le *breaking action*.

Le *gentle rebounding* est un rebond périodique avec un relâchement constant du poids du corps. Il requiert l'utilisation de la fatigue et la réalisation de différents rythmes dans différentes parties du corps.

Le *shoulder breathing* est une respiration verticale caractérisée par l'ouverture des aisselles qui développe dans le corps une sensation de « vulnérabilité ». Le *shoulder breathing*, pourtant s'affiliant plus au *breathing*, est une partie du *jumping* car il contribue à réinstaller l'idée d'inspirer et d'expirer dans ce composant.

Le *breacking action* développe un rebond erratique en permettant la création d'espaces différents, de rythmes et d'accélération diversifiés dans le corps.

#### d) Expanding



FIGURE 3.7 – Emio Greco exécutant l'*expanding*.

Au cours de l'*expanding*, le danseur étend l'espace intérieur du corps, se déplace à travers l'espace extérieur en ouvrant les jambes et utilise le transfert de poids par les pieds. Il utilise la respiration, l'inspiration et l'expiration puis le relâchement pour atteindre ses extensions. L'*expanding* est distinct du *breathing*, car il est une extension de l'ensemble du corps (les jambes sont ouvertes) dans les différentes directions de la *kinésphère* plutôt qu'une extension verticale. La figure 3.7 représente Emio Greco exécutant l'*expanding*. Ce composant s'articule en différentes nuances : l'*open boundaries*, le *transfer*

of balance, et l'*articulated rhythm*.

L'*open boundaries* est une articulation supplémentaire du *breathing*, où le corps est obligé de rompre ses limites spatiales.

Le *transfer of balance* est une continuation de l'*expanding* où la circulation est maintenue sans fin, en déplaçant le poids d'un pied à un autre autour du centre de masse (au sens du transfert de poids développé dans les descripteurs du mouvement de Baternieff).

L'*articulated rhythm* développe l'*expanding* à travers le changement de rythme et d'accélération, crée de nouvelles nuances et ramène le corps plus loin dans l'extension.

#### e) Reducing

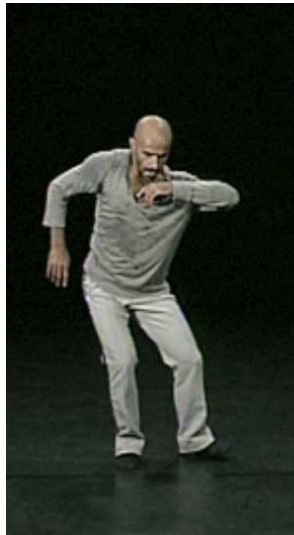


FIGURE 3.8 – Emio Greco exécutant le *reducing*.

Au cours du *reducing*, le danseur crée une qualité de mouvement soutenue et lente. Il comprend la mesure du temps, la poursuite interne des expériences corporelles et l'incorporation du mouvement. La figure 3.8 représente Emio Greco exécutant le *reducing*. Ce composant s'articule en différentes nuances : le *thick air* et le *freeze*.

Le *thick air* est un état mental où le corps a besoin de créer et d'incarner une qualité métaphorique d'un air épais au sein et autour de ses mouvements. Ceci amène le danseur à réduire la longueur de son mouvement et l'énergie qu'il a précédemment créée durant les autres composants de *DS/DM*.

Pour réaliser le *freeze*, le danseur fige son mouvement corporel tout en continuant à vivre les sensations intérieures dues à l'écho de ses mouve-



ments antécédents.

### 3.6 Synthèse

Tout comme la prosodie est liée à l'ensemble des fonctions langagières, nous considérons les qualités de mouvement comme une composante gestuelle liée à l'ensemble des fonctions gestuelles, y compris les aspects cinématiques.

Ce qui est perçu comme des qualités de mouvement est tout ce qui est au-delà de la simple portée motrice du mouvement. Prenons par exemple un geste qui consiste en une trajectoire rectiligne de l'effecteur (la main par exemple) ainsi que sa cinématique (mouvement à vitesse constante, accéléré, ralenti, etc.) permettant de lier un point A à un point B. Lorsque nous demandons à un individu d'effectuer ce geste simple, la première question qu'il pourrait poser est : « Comment dois-je effectuer ce geste ? ». Tous les aspects répondant à cette question, y compris les aspects cinématiques, qui différencient son geste d'une trajectoire rectiligne uniforme, sont des aspects qualitatifs de son geste. Ces aspects qualitatifs peuvent être atteints en faisant varier les dimensions d'efforts de Laban décrites dans la section 3.2.2, et mises en jeu pour effectuer le mouvement, à savoir l'espace, le temps, le flux musculaire et le poids (ici, on entend par le poids, la notion labanienne liée à la sensation du poids). Les qualités de mouvement réalisées peuvent alors révéler l'affect d'un individu ou simplement donner un habillage et une coloration à ce geste.

Comme le montre la figure 3.9, les qualités de mouvement (qui opèrent au niveau physique du mouvement) sont une coloration qualitative perçue découlant par exemple d'une variation des facteurs d'effort. Rappelons que la notion d'effort est un des grands axes de la théorie d'analyse de mouvement de Laban (autre que le corps, l'espace et la forme) qui permet d'observer et d'expérimenter les mouvements du corps selon quatre facteurs : le poids, le temps, l'espace et le flux. Ces quatre facteurs sont polarisés : le poids est entre « fort » et « léger », le temps entre « soudain » et « soutenu », l'espace entre « direct » et « indirect » (ou « flexible »), et le flux entre « contenu » et « libre ». Les variations des facteurs suivant les quatre dimensions et leurs polarités d'efforts créent un espace quadridimensionnel de qualités d'effort. Ces qualités d'effort sont perçues par autrui comme des qualités de mouvement.

L'intention peut produire des changements, par exemple, dans le degré de contrôle sur le mouvement ou la force, dans l'espace et la temporalité du mouvement. Et ainsi, l'intention façonne le mouvement avec différentes nuances qui sont perçues par autrui comme différentes qualités de mouvements. Ces nuances ou variations qui constituent ce qu'on perçoit comme

qualités sont donc intentionnelles et peuvent être apprises, contrôlées et perfectionnées, comme c'est le cas dans l'apprentissage de la danse. Selon, Lockhart *et al.* (1966) dans le livre *Modern dance ; building and teaching lessons* :

Movements and movement sequences become shaped into meaningful wholes, into compositions. Preparation for learning to shape movement into motion comes as a result of the student becoming sensitive to the general characteristics of movement quality and the shading of quality through the use of dynamics[...] (page119, (Lockhart *et al.*, 1966))

Même si les qualités de mouvement sont une caractéristique du geste que nous pouvons consciemment et intentionnellement modifier (pendant l'apprentissage de la danse, par exemple), elles peuvent toutefois révéler des émotions ou des états de corps du danseur. Selon Lockhart *et al.* (1966) :

Each characteristic movement quality invokes a different general feeling or state of being. As each is experienced, the student should become aware of the impact of moving according to a certain quality in order to consciously note the form of inner response to it, for motion and emotion are closely linked. The student should also be conscious of the way in which the dynamics more specifically pinpoint the sensations that are aroused.(page 119, (Lockhart *et al.*, 1966))

### 3.7 Définition proposée

Dans le présent document, la notion de qualités d'un mouvement doit être comprise comme la manière dont le mouvement est exécutée, c'est-à-dire ses différentes colorations perçues. Nous nous référons à la définition de Blom et Chaplin (1982) :

Movement Qualities are the distinctly observable attributes or characteristics produced by dynamics and made manifest in movement. (page 73, (Blom et Chaplin, 1982))

Les qualités de mouvement peuvent différencier (de façon qualitative) deux mouvements effectuant la même action et ayant la même trajectoire. Ce sont des qualifications du geste qui peuvent se situer sur plusieurs échelles :

1. **Dynamique** : Il est possible de colorer le geste en termes de dynamique, c'est-à-dire en termes d'évolution des caractéristiques gestuelles (la position, la vitesse ou l'accélération d'un geste) dans le temps. Dans ce manuscrit nous étudierons quelques qualités de mouvement en fonction de trois dynamiques suivant la fréquence d'oscillation et l'amortissement d'un geste.

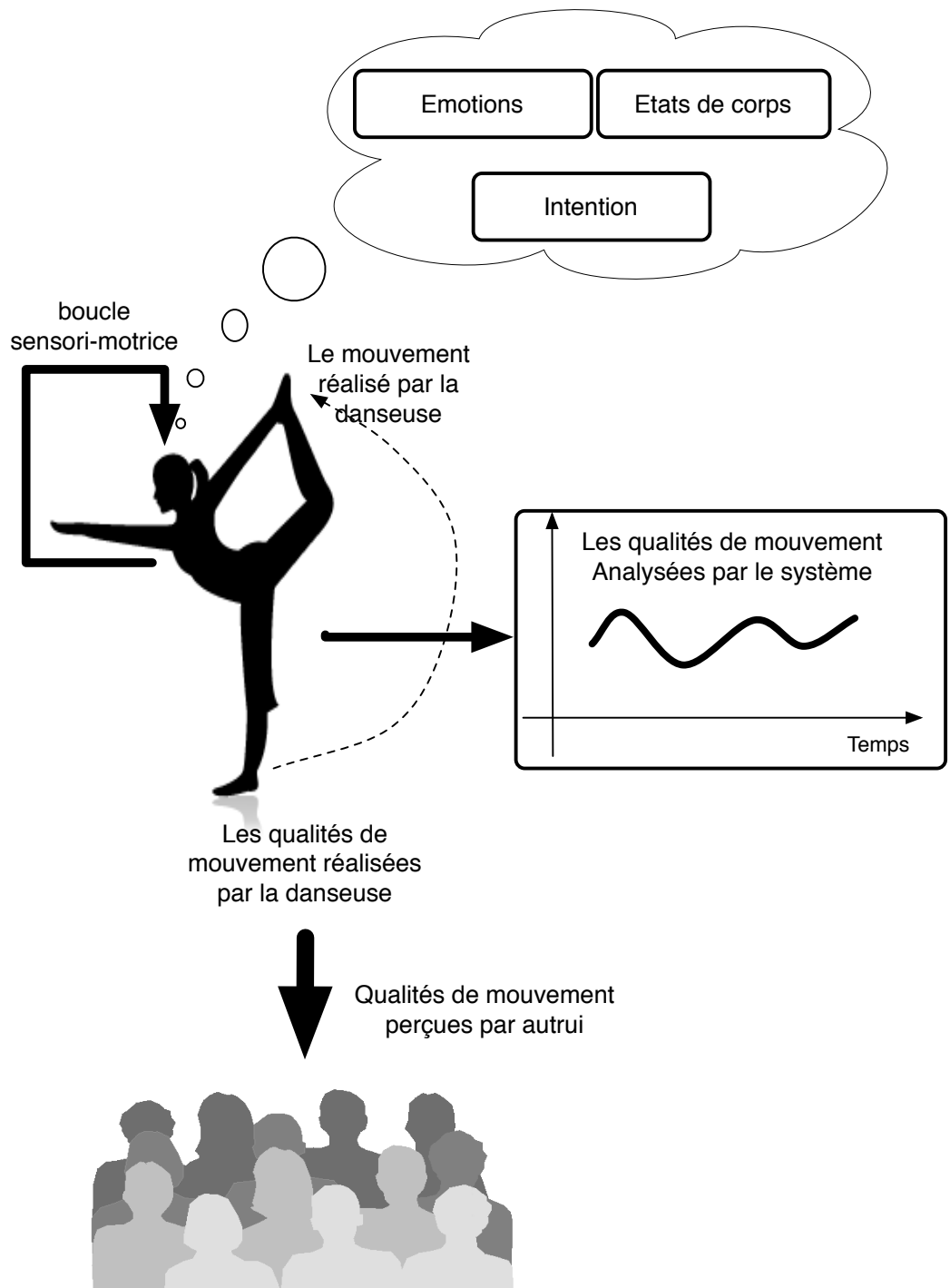


FIGURE 3.9 – Formalisation des qualités de mouvement

2. **Métaphorique** : Les qualités de mouvement peuvent habiller le geste de façon métaphorique, pour représenter une image qui se réfère à une idée abstraite. (cf la définition du *reducing* qui repose sur l'idée métaphorique de la qualité visqueuse, comme si le geste évoluait dans un pot de miel).
3. **Emphatique** : Les qualités de mouvement peuvent avoir comme mission de renforcer ou d'exagérer une autre fonction ou gestuelle afin de conférer des qualités emphatiques au geste. Ce type de qualités de mouvement ne sera pas étudié dans la présente thèse.

### 3.8 Conclusion

Les études existant dans la littérature en IHM et se basant principalement sur les théories de Laban montrent que l'utilisation de qualités de mouvement en IHM est prometteuse. Cependant, cela requiert un cadre de modélisation des nouvelles possibilités d'interaction impliquant cette expression corporelle. Notre travail de recherche est né de ce besoin. Il propose un formalisme définissant les qualités de mouvement ainsi qu'une modélisation pour leur utilisation comme modalité d'interaction. Cette utilisation peut se baser sur un glossaire existant de qualités de mouvement issu de la théorie de Laban, comme c'est le cas dans les travaux en IHM précédemment cités. Elle peut aussi se baser sur un glossaire propre à un chorégraphe (des textes descriptifs des qualités, des extraits vidéos de performances de qualités de mouvement, un glossaire, des schémas...etc.) ou un glossaire élaboré à partir d'un usage idiosyncratique dans un contexte artistique.

Les applications impliquant des interactions basées sur les qualités de mouvement, que nous avons développées, ne reposent pas sur les catégories d'effort de Laban à cause de leur trop grande généralité. Nous avons choisi de nous baser sur le glossaire développé par la compagnie Emio Greco |PC (détaillé dans la section 3.5) avec laquelle nous avons collaboré tout au long de la thèse. Cependant, Les méthodes que nous proposons peuvent être re-spécifiées dans le cadre d'autres approches chorégraphiques, pour peu que l'on dispose d'une bonne connaissance préalable du vocabulaire étudié.



## Chapitre 4

# Analyse de Qualités de Mouvement

### 4.1 Vue d'ensemble de la reconnaissance de gestes

Le domaine de la reconnaissance de gestes a connu un grand essor durant les 20 dernières années à travers diverses applications telles que la reconnaissance de la voix, de l'écriture, la surveillance automatique, la rééducation, la performance numérique ou les jeux vidéo (Mitra et Acharya, 2007). Aujourd'hui, avec la commercialisation d'outils de captation du mouvement du corps entier, tels que la Microsoft Kinect<sup>1</sup>, l'intérêt pour ce domaine est d'autant plus d'actualité. Nous nous limiterons dans cette section aux travaux appliqués à la danse, qui proposent des méthodes d'analyse et de reconnaissance de gestes à partir de données du mouvement capté.

#### 4.1.1 Des systèmes de captation

On peut affirmer que les contraintes techniques liées au mode de captation choisi, influencent la reconnaissance du geste. Pour cette raison, nous proposons dans cette section une vue d'ensemble des systèmes de captation, et en particulier ceux utilisés dans la danse. Ceci a fait l'objet d'un article d'ouvrage auquel nous avons contribué, à l'occasion du TanzKongress en 2009, (Bevilacqua *et al.*, 2011a).

Différents types de systèmes de captation portables permettent de mesurer certaines caractéristiques du mouvement d'une partie du corps à laquelle ils sont reliés. Par exemple, les accéléromètres et gyroscopes miniatures permettent d'obtenir les inclinations, les vitesses de rotations et les accélérations du mouvement de la partie du corps à laquelle ils sont fixés. Ces

---

1. Le site Internet de la Microsoft Kinect, accédé le 29/10/2012  
<http://www.microsoft.com/en-us/kinectforwindows/>

types de capteurs sont présents dans l'industrie des jeux vidéos notamment avec la manette de la console Wii<sup>2</sup>. Il existe aussi des capteurs de flexion qui mesurent l'angle d'une jointure. En règle générale, tous ces capteurs sont reliés à des émetteurs de données sans fil.

Les systèmes de captation vidéo sont efficaces pour capter la posture du corps entier et le mouvement à distance. Par exemple, un système de caméra unique permet de suivre la silhouette du danseur dans l'installation *DS/DM* qui est étudiée dans notre thèse. Un grand nombre de logiciels d'analyse du mouvement, dont *Eyesweb* (Camurri *et al.*, 2000), reposent sur l'extraction de la silhouette du corps entier de l'utilisateur ou de certaines parties du corps. Récemment, la commercialisation de la caméra infra-rouge Microsoft Kinect a permis de démocratiser la captation vidéo en 3D pour un certain nombre d'applications scientifiques, artistiques ou industrielles.

Les systèmes optiques 3D de captation de mouvement, initialement développés pour des études de biomécanique ou pour l'animation, permettent la reconstruction 3D d'un squelette. Néanmoins, ils nécessitent le port d'une combinaison et l'utilisation de petits marqueurs réfléchissants sur le corps. De ce fait, ces systèmes sont généralement complexes à manipuler en temps réel et dans des situations de performance. Pendant la thèse, nous avons testé le système de captation 3D *Optitrack* avec 12 caméras infra-rouge, et ce pour le développement du projet *CLOUD*.

Même si la plupart des systèmes de captation reposent sur les mouvements du corps, de nombreux autres types de captations sont possibles en utilisant des signaux physiologiques. Par exemple, des mécanismes tels que l'activation musculaire peuvent être mesurés à partir de l'activité électrique des capteurs mis en contact avec la peau (électromyographie). Ces systèmes ont été intégrés dans des spectacles de danse, comme ceux de la compagnie *Palindrome*, ou dans des spectacles de musiques électroniques (Tanaka et Knapp, 2002). Cette captation peut être particulièrement utile dans le cas de la danse car elle rend compte d'éléments importants où l'activité musculaire ne produit pas de mouvements perceptibles visuellement, tels que le « pré-mouvement ». Par ailleurs, d'autres types de mesures physiologiques existent, comme les mesures de la respiration, des battements du cœur, de la conductivité électrique de la peau ou encore de l'activité électrique du cerveau (EEG). Cependant ces mesures sont encore très peu utilisées dans le domaine de l'IHM (l'émergence des interfaces cerveau-machine représente un cas particulier que nous ne traiterons pas ici).

---

2. Le site Internet de la Wii, accédé le 29/10/2012  
[http://www.nintendo.fr/NOE/fr\\_FR/wii\\_54.html](http://www.nintendo.fr/NOE/fr_FR/wii_54.html)

### 4.1.2 Des modèles de reconnaissance du geste

Les modèles fréquemment utilisés dans la littérature pour des tâches de reconnaissance d'actions ou de reconnaissance de gestes à partir des données captées sont les modèles de Markov cachés (ang. *Hidden Markov Models* (HMM)). A cet effet, le cadre traditionnel des HMM a connu plusieurs adaptations et extensions dues aux contraintes liées aux types de vocabulaire gestuel auxquels ils sont appliqués. Par exemple, dans le cas de la danse, nous ne disposons généralement que de peu d'exemples de référence. Afin de prendre en compte cette contrainte, Rajko *et al.* (2007) généralisent les HMM, avec un modèle appelé SNM (ang. *semantic network models*), qui réduit significativement la phase d'entraînement. Cette contrainte est aussi une des spécificités de l'algorithme de suivi de gestes (ang. *gesture follower* (GF)) développé à l'Ircam pour le contexte de la performance par Bevilacqua *et al.* (2010). Le GF génère un HMM à partir d'un seul et unique exemple enregistré, en associant un état caché à chaque trame du signal gestuel. Cette implémentation a été initialement conçue pour la problématique d'alignement temporel du geste mais a démontré sa capacité à effectuer aussi des tâches de reconnaissance temps réel de gestes dansés (Bevilacqua *et al.*, 2011a), de gestes musicaux (Bevilacqua *et al.*, 2012) ou même de suivi de voix (Beller, 2011).

Cependant, les problématiques spécifiques à l'analyse et à la reconnaissance de gestes dansés n'ont que très peu été abordées et comportent toujours des défis en informatique. Parmi les travaux remarquables de la littérature, un certain nombre proviennent du groupe de recherche *Média, Art et Ingénierie* de l'université de l'Arizona. Ils ont produit des systèmes multimodaux (retour sonore et visuel) interactifs pour la danse comportant des outils de reconnaissance de gestes dansés à partir de données issues de captation optique 3D du mouvement du corps entier d'un ou de plusieurs interprètes sur scène (Qian *et al.*, 2004, James *et al.*, 2006). Ils se sont aussi intéressés à la tâche de reconnaissance de phrases chorégraphiques structurées en séquences de mouvements dansés (Dyaberi *et al.*, 2004). Pour cela, ils utilisent une méthode reposant sur une formulation de graphes topologiques où chaque état représente une séquence dansée. De plus, ils ont été parmi les premiers dans le domaine de la reconnaissance automatique, à s'intéresser à la notion de qualité de mouvement. Pour cela, ils se sont appuyés sur l'analyse du mouvement de Laban (LMA) (Laban, 1963). Plus précisément, Swaminathan *et al.* (2009) ont utilisé récemment des réseaux dynamiques bayésiens pour l'analyse des *qualités de formes* issues de la LMA.

La caractérisation du geste proposée par la LMA est suffisamment générique pour s'appliquer à toute une palette de types de gestes. Elle donne, de ce fait, une portée quasiment universelle à cette théorie. Cette généralité, issue de la LMA, semble avoir de l'attrait puisque la plupart des



modèles d'analyse de gestes dansés reposent sur les théories labaniennes. Cette généralité est défendue par Bouchard et Badler (2007) qui utilisent des descriptions du mouvement de haut niveau, issues des paramètres d'efforts de Laban, capables de décrire de façon générale tout mouvement. Ceci leur permet d'obtenir un outil capable de segmenter n'importe quel mouvement suivant ces descripteurs labaniens, sans en avoir enregistré un exemple de référence pendant la phase d'entraînement. Leurs descripteurs d'efforts sont obtenus en entraînant des réseaux de neurones uniquement à partir d'enregistrements de 12 types de mouvements de référence, représentant 3 nuances des 4 classes d'efforts de Laban (espace, temps, poids et flux). En outre, la LMA est aussi utilisée dans certaines méthodes d'extraction d'émotions à partir d'un geste quelconque du corps entier (Camurri *et al.*, 2000, Clay *et al.*, 2009). Par exemple, Camurri *et al.* (2000) ont développé dans leur logiciel Eyesweb, un algorithme de catégorisation automatique de gestes en quatre émotions primaires (colère, peur, tristesse et joie) qui prend en entrée des descripteurs de haut niveau inspirés de la LMA. Par ailleurs, la LMA a été utilisée dans des applications de reconnaissance de gestes en robotique : ainsi Rett et Dias (2007), Rett *et al.* (2008) ont implémenté, dans leur robot Nicole, une méthode probabiliste basée sur une approche bayésienne, lui permettant de reconnaître en temps réel des séquences de gestes définies dans la LMA.

Enfin, citons les travaux de synthèse de gestes basés sur des modèles probabilistes ayant comme point de départ la LMA. Les travaux remarquables proviennent du groupe de recherche autour de Norman Badler qui se sont très tôt intéressés à la notion de qualités de mouvement à travers le formalisme de Laban. Leur système, appelé Emote, permet de synthétiser un geste en faisant varier des paramètres qui en contrôlent les qualités, pour animer de façon réaliste un personnage virtuel (Chi *et al.*, 2000, Zhao, 2001). Plus récemment, Zhao et Badler (2005) ont proposé un modèle d'apprentissage, conçu pour un contexte performatif, qui permet l'acquisition et la synthèse de gestes en apprenant les qualités de mouvement en temps réel.

## 4.2 Cahier des charges

Dans cette section, nous présentons la problématique et les contraintes liées à la reconnaissance de qualités de mouvement en temps réel. Nous introduisons ensuite les deux modèles de reconnaissance de qualités de mouvement développés dans la thèse et qui répondent à notre « cahier des charges ».

### 4.2.1 La problématique

La curiosité de comprendre la notion de qualités de mouvement remonte à ma pratique personnelle de la danse contemporaine. Elle s'est formalisée en problématique de recherche, au tout début de la thèse, lors de ma collaboration avec la compagnie EG|PC et particulièrement de mes échanges avec Bertha Bermudez (chercheuse et danseuse de la compagnie et coauteur de l'article (Fdili Alaoui *et al.*, 2013)). Nous sommes partie du glossaire, élaboré par la compagnie, notamment à partir des théories labaniennes, qui décrit les qualités de mouvement des composants de leur atelier, appelé *Double Skin/Double Mind (DS/DM)* (Bermudez, 2009, Bermudez et Fernandes, 2010, Bermudez *et al.*, 2011). Notre problématique s'est alors cristallisée sur l'élaboration de méthodes computationnelles capables de traiter ces qualités de mouvement dansé issues de *DS/DM* en temps réel (Fdili Alaoui *et al.*, 2013, 2012, 2011). Plus précisément, l'objectif était d'élaborer des méthodes reconnaissance qui identifient une qualité de mouvement et lui donnent un label parmi ceux du vocabulaire étudié (le label qui correspond au mieux à la qualité exécutée).

La difficulté de cette problématique est liée à la nature même des gestes qui sont en jeu en danse moderne et contemporaine et particulièrement dans *DS/DM*. Souvent, ces gestes ne s'exécutent pas à partir d'une trajectoire ou d'une posture spécifique. Il s'agit plutôt de gestes produits en « jouant » sur les qualités et dynamiques du mouvement. Les composants de *DS/DM*, décrits dans la section 3.5, en sont un exemple très parlant, car ils peuvent prendre différentes trajectoires ou postures dans le temps mais sont caractérisés par des dynamiques et des qualités spécifiques et formalisées. Ceci suggère que nos modèles computationnels doivent être capables de se baser sur des caractéristiques de plus haut niveau représentant les qualités de mouvement modélisées et non uniquement sur les trajectoires gestuelles. De plus ils doivent pouvoir prendre en compte les variations inter-individuelles d'exécution des qualités de mouvement.

Nous avons choisi dans la présente thèse d'étudier le vocabulaire développé par la compagnie Emio Greco |PC, plutôt que les catégories d'effort de Laban en raison de leur trop grande généralité. Ce choix est motivé par notre objectif qui est, rappelons-le, d'élaborer des modèles de reconnaissance automatique prenant en compte des nuances très fines du geste étudié en mettant l'accent sur ses caractéristiques qualitatives spécifiques. Grâce à cela, notre approche permet d'obtenir des résultats de reconnaissance de qualités de mouvement, qu'une approche labanienne, générique, ne permettrait pas d'obtenir. L'approche proposée dans la thèse peut être re-spécifiée dans le cadre d'autres vocabulaires chorégraphiques, pour peu que l'on dispose d'une bonne connaissance préalable des qualités de mouvement étudiées.

### 4.2.2 Les contraintes

La problématique présentée plus haut implique un certain nombre de contraintes pour le système d'analyse :

1. Une phase d'apprentissage réduite : nous ne disposons pas d'une base de données fournie de plusieurs exemples d'exécution de qualités. Néanmoins il est possible d'enregistrer un nombre réduit d'exemples de référence de chaque composant du vocabulaire.
2. L'invariance par changement d'échelle temporelle : le système doit être capable de s'adapter aux différentes progressions temporelles de la performance et ainsi reconnaître un composant même s'il est exécuté plus lentement ou plus rapidement.
3. L'adaptation par rapport au système de captation : le système de reconnaissance doit pouvoir traiter des données provenant de systèmes de captation divers, notamment de captation vidéo.

### 4.2.3 Les modèles de reconnaissance de qualités de mouvement développés dans la thèse

La figure 4.1 illustre les deux modèles développés dans la thèse afin de reconnaître en temps réel une qualité de mouvement et lui donner un label parmi ceux du vocabulaire étudié. La figure détaille les différentes étapes que comportent les méthodes proposées et que nous présentons dans les deux sections qui suivent.

Notre première préoccupation a été de nous pencher sur l'aspect dynamique sous-jacent aux qualités de mouvement de *DS/DM*, à savoir l'évolution temporelle des paramètres gestuels de position, vitesse et accélération. Nous sommes partie de l'intuition que les dynamiques étudiées étaient similaires aux comportements dynamiques pouvant être générés par un modèle physique masse-ressort (MSS) régi par des forces élastiques et visqueuses et constitué par une masse accrochée à un ressort et contrainte de se déplacer dans une seule direction. De cette intuition, découlera aussi la modélisation des visuels par MSS décrits dans le chapitre 5. Cette « similarité physico-réaliste », définie dans la section 5.2, fait d'ailleurs l'objet d'une expérimentation décrite dans le chapitre 7, qui montre que les MSS sont de bons candidats pour produire des rendus visuels dynamiques qui seront associées par les utilisateurs aux qualités de mouvement de *DS/DM*.

A partir de cette intuition, l'idée était de modéliser explicitement les dynamiques de *DS/DM* exécutées par une extrémité du corps (ici, la main), à partir de l'équation de la dynamique du modèle constitué d'une masse et d'un ressort. Nous avons donc développé un premier modèle de reconnaissance de qualités de mouvement qui repose sur cette modélisation explicite. Ensuite, à partir de cette structure déjà définie, la phase de reconnaissance en temps réel de qualités de mouvement a consisté à identifier les

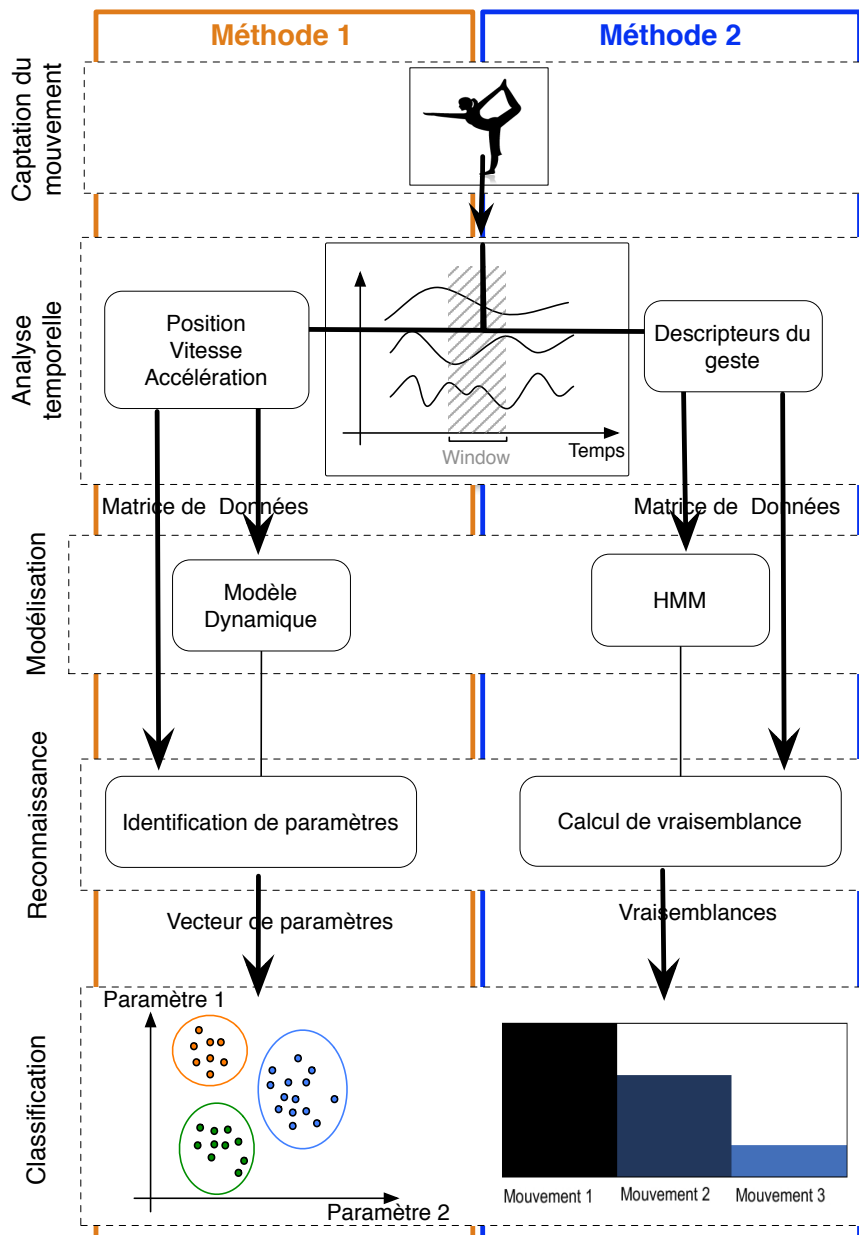


FIGURE 4.1 – Modélisation des qualités de mouvement : les deux méthodes développées.

paramètres du système dynamique les mieux adaptés aux données expérimentales grâce à des méthodes d'identification de paramètres (ang. *fitting*) telles que la méthode des moindres carrés ou la méthode de filtrage particulière. Ce premier modèle ne nécessite ni apprentissage à partir de gestes de référence enregistrés, ni descripteurs gestuels décrivant les qualités de

mouvement, puisque l'équation dynamique elle-même joue ce rôle. De ce fait, l'invariance par changement d'échelle temporelle est garantie puisque le modèle s'affranchit d'exemples de référence avec lequel le geste, exécuté éventuellement plus lentement ou plus rapidement, aurait pu être comparé.

Dans un deuxième temps, nous nous sommes intéressée à des méthodes de reconnaissance automatique de mouvement issue du domaine de l'apprentissage automatique. Nous avons exploré ce champ afin de développer une méthode qui soit en mesure de prendre en compte la combinaison d'un grand nombre de paramètres gestuels en parallèle et de considérer les qualités de mouvement dans leur globalité, au-delà des caractéristiques dynamiques. Pour ce faire, nous avons adopté une approche combinant des descripteurs gestuels de haut niveau (ang. *features*) définis pour caractériser les qualités de mouvement étudiées, avec un algorithme qui permet d'apprendre des structures à partir de données enregistrées et de classer le geste en entrée parmi les classes du vocabulaire étudié.

Précisément, nous avons choisi d'utiliser l'algorithme de suivi de geste (GF) développé au sein de l'équipe IMTR à l'Ircam par Bevilacqua *et al.* (2010) qui est une des deux équipes où a été conduite la présente thèse. La raison de ce choix est que le GF est particulièrement adapté aux contraintes que nous avons définies dans la section précédente, puisqu'il repose sur une phase d'apprentissage réduite basée sur un seul geste de référence par classe étudiée. De plus, il permet une certaine invariance par changement d'échelle temporelle parce qu'il permet de reconnaître un geste même s'il est exécuté plus lentement ou plus rapidement. Dans la méthode que nous proposons, le GF prend en entrée nos descripteurs de qualités de mouvement. Pendant la phase de modélisation, il utilise des méthodes basées sur un formalisme probabiliste afin d'apprendre la structure d'un HMM à partir des données. Enfin, pendant la phase de reconnaissance, il calcule des valeurs de vraisemblance qui représentent les probabilités que chacun des modèles ait généré les qualités du mouvement en entrée.

### 4.3 Méthode 1 : modélisation par système dynamique

La figure 4.2 illustre les étapes de la première approche que nous présentons dans cette section.

Lors de la première phase (hors ligne, dite de modélisation), il s'agit de formaliser les dynamiques des composants de *DS/DM* exécutées par la main de l'utilisateur, grâce à des équations différentielles. Sur la base de cette formalisation, une étape d'analyse temporelle calcule, à partir des données gestuelles capturées, certaines valeurs cinématiques de l'équation différentielle telles que la vitesse et l'accélération.

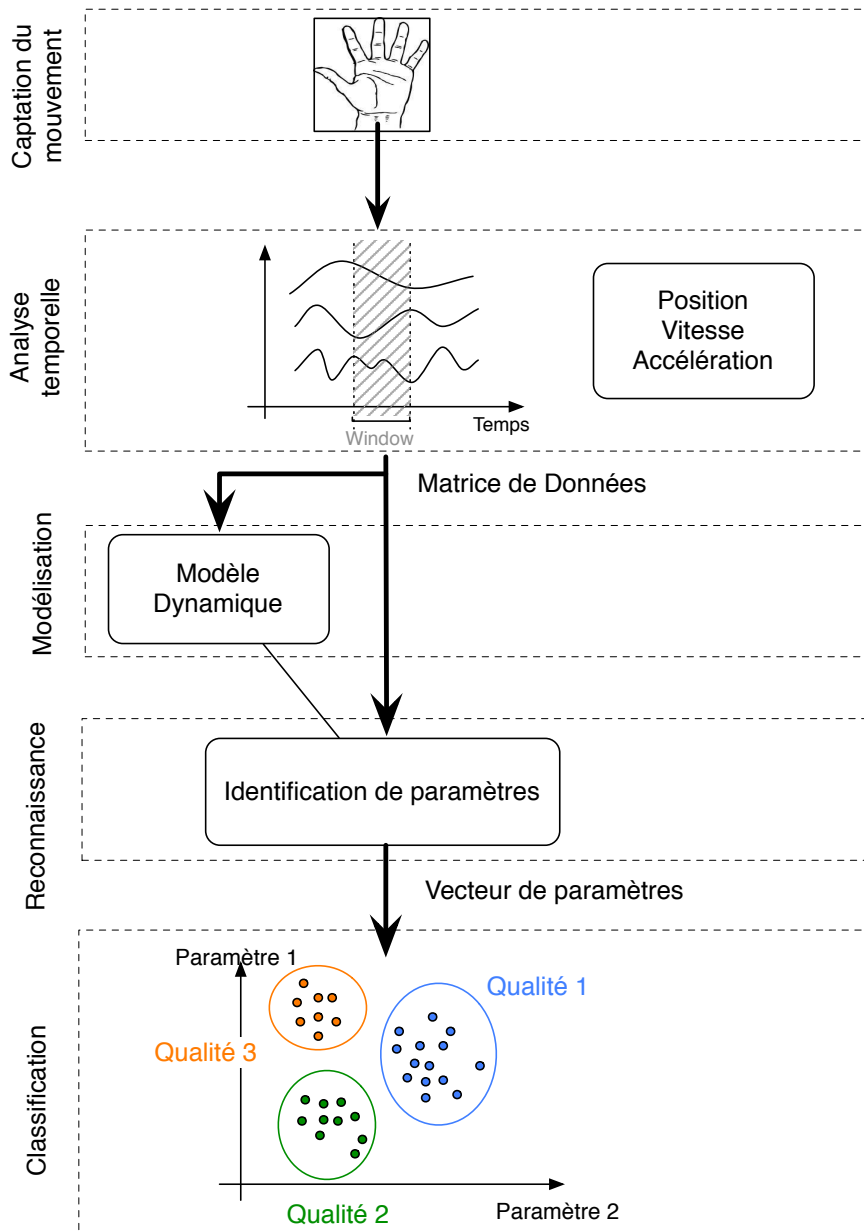


FIGURE 4.2 – Modélisation des qualités de mouvement par identification de systèmes dynamiques.

La seconde phase (en ligne, dite de reconnaissance) consiste à identifier les paramètres des équations différentielles qui caractérisent le mieux les données en appliquant une des méthodes d'identification de système dynamique que nous présentons ci-dessous. Les paramètres identifiés permettent de regrouper les données en classes et ainsi de déterminer la dyna-

mique de la nouvelle donnée entrante.

### 4.3.1 Les dynamiques des qualités de mouvement

Nous considérons l'aspect dynamique des qualités de mouvement de  $DS/DM$ , présentées dans la section 3.5 :

- Dans le *breathing*, le corps inspire (expansion verticale jusqu'à la longueur maximale du corps) et expire (relâchement à partir de l'expansion maximale), inspire et expire à nouveau et ainsi de suite. Ce composant a un caractère répétitif et oscillatoire avec de faibles fréquences et énergies.
- Pendant le *jumping*, le danseur laisse rebondir de façon répétitive son corps pendant une longue période. C'est un mouvement dont la dynamique est oscillatoire avec de grandes fréquences et énergies.
- Au cours de l'*expanding*, le corps s'étend dans différentes directions et voyage à travers l'espace, puis se relâche à partir de l'expansion maximale jusqu'à la position initiale. Puis il s'étend à nouveau et relâche avec une extension diminuée et ainsi de suite jusqu'à son arrêt complet. Ce composant a une dynamique oscillante, légèrement amortie.
- Enfin, le *reducing* a un mouvement évoluant dans un environnement visuels. Il crée une dynamique soutenue sans oscillations, qui ralentit jusqu'à sa cessation complète. Ce composant a donc une dynamique aperiodique, très amortie, au point d'interdire toute oscillation.

### 4.3.2 Le système dynamique

Dans la modélisation proposée, nous faisons l'hypothèse que ces dynamiques de mouvement sont régies par un modèle physique. Bien que cela représente certainement une réduction de ce que ces mouvements peuvent englober comme qualités, cette approche permet de concevoir des modèles computationnels des équations dynamiques.

Dans le cas de  $DS/DM$ , les dynamiques des composants peuvent être formulées comme suit :

- Les *breathing* et *jumping* ont une dynamique oscillatoire sans dissipation. La fréquence des oscillations évolue au fil du temps.
- L'*expanding* a une dynamique oscillatoire avec une légère dissipation.
- Le *reducing* a une dynamique complètement amortie.

Sur la base de cette formulation, ces composants peuvent être modélisés comme les trois régimes particuliers d'un système oscillant à un degré de liberté. Un tel système oscillant est régi par une équation différentielle li-

néaire du second ordre qui s'écrit :

$$a\ddot{q} + b\dot{q} + cq = d \quad (4.1)$$

En mécanique, cette équation permet notamment de modéliser la dynamique du système constitué d'une masse  $m$  accrochée à un ressort de raideur  $K$  et contrainte de se déplacer dans une seule direction dans un environnement de viscosité  $\nu$ . Le mouvement de la masse est régi par l'équation différentielle du second ordre explicitée ci-dessus, avec  $a = m$ ,  $b = \nu$  et  $c = -K$  et  $d = F_{extérieure}$  et  $q = (L - L_0)$ , avec  $L$  (respectivement  $L_0$ ) la longueur (respectivement la longueur au repos) du ressort.

Le choix de ce modèle est certainement réducteur par rapport à des modélisations plus complexes du geste (Gibet, 2002). Il s'agit à ce stade de proposer un modèle permettant de modéliser et de détecter les différents composants *breathing*, *jumping*, *expanding* et *reducing*. De plus ce modèle est cohérent avec la visualisation basée sur un système masse-ressorts, décrite dans le chapitre 5.

### 4.3.3 Association des régimes du système dynamique avec les qualités de mouvement

Les trois régimes particuliers du modèle linéaire homogène (sans forces extérieures supplémentaires) ci-dessus, sont le régime conservatif où  $b = 0$ , le régime semi-dissipatif où  $b \neq 0$  et  $b < 2\sqrt{ac}$  et enfin le régime complètement dissipatif où  $b \neq 0$  et  $b > 2\sqrt{ac}$ . Ces trois régimes reproduisent des dynamiques oscillatoires, oscillatoires amorties et amorties sans oscillations. Ils créent trois sous-ensembles convexes dans un espace affine de dimension 3 (l'espace des paramètres) qui représentent des comportements dynamiques particuliers.

- Le régime conservatif représente une dynamique oscillatoire correspondant à des qualités de *breathing* ou *jumping* selon que la fréquence est basse ou élevée.
- Le régime semi-dissipatif représente une dynamique oscillatoire amortie correspondant à des qualités d'*expanding*.
- Le régime dissipatif représente une dynamique amortie correspondant à des qualités de *reducing*.

L'étape de classification consiste donc à déterminer le régime du geste en entrée en fonction des paramètres identifiés.

#### a) Régime conservatif ( $b = 0$ )

Dans ce cas l'équation devient :

$$a\ddot{q} + cq = 0 \quad (4.2)$$



Cette équation a une solution générale, qui s'écrit

$$q = Q_1 \cos \sqrt{c/a} t + Q_2 \sin \sqrt{c/a} t \quad (4.3)$$

En posant  $Q_1 = A \cos \phi$  et  $Q_2 = -A \sin \phi$ , on obtient

$$q = A \cos(\sqrt{c/a} t + \phi) \quad (4.4)$$

Ainsi ce régime est caractérisé par un mouvement sinusoïdal défini par une amplitude  $A$ , une phase  $\phi$  et une pulsation propre  $\omega_0 = \sqrt{\frac{c}{a}}$ . Cela est illustré dans la figure 4.3.

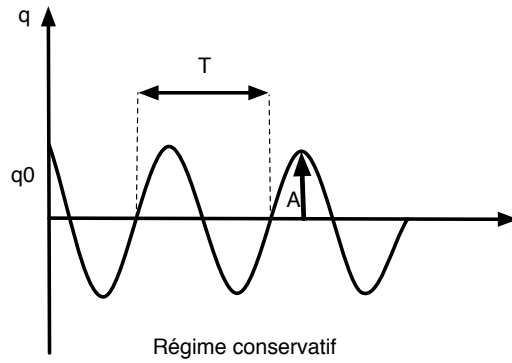


FIGURE 4.3 – Le régime conservatif d'un système oscillant à un degré de liberté régi par une équation différentielle du second ordre

#### b) Régime semi-dissipatif ( $b \neq 0$ et $b < 2\sqrt{ac}$ )

Dans ce cas, l'équation admet deux racines complexes conjuguées qui conduisent à une solution oscillante mais amortie. Plus  $b$  (la viscosité) est élevée plus les oscillations sont amorties.

Prenons  $\beta$  défini par  $\beta = \frac{b}{2\sqrt{ca}}$  et  $\omega_0 = \sqrt{\frac{c}{a}}$ . Dans le régime semi-dissipatif  $\beta < 1$ , la solution s'écrit :

$$q = Ae^{-\beta\omega_0 t} \cos\left(\sqrt{1 - \beta^2}\omega_0 t + \varphi\right) \quad (4.5)$$

Comme illustré dans la figure 4.4, le mouvement de la masse en régime semi-dissipatif est représenté par une sinusoïde définie par une amplitude  $A$ , une phase  $\phi$ , une pulsation propre  $\omega_0 = \sqrt{\frac{c}{a}}$  et une enveloppe  $Ae^{-\beta\omega_0 t}$  qui représente la diminution exponentielle de l'amplitude en fonction du temps sous l'effet de l'amortissement.

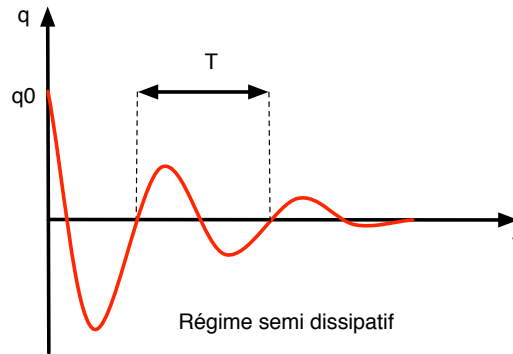


FIGURE 4.4 – Le régime semi-dissipatif d’un système oscillant à un degré de liberté régi par une équation différentielle du second ordre

**c) Régime dissipatif ( $b \neq 0$  et  $b > 2\sqrt{ac}$ )**

Dans ce cas,  $b$  élevé conduit à des amortissements élevés qui rendent le discriminant positif et interdisent ainsi toute oscillation. Comme illustré dans la figure 4.5, ce régime est donc amorti (ou dissipé) sans aucune oscillation. En prenant encore une fois  $\beta = \frac{b}{2\sqrt{ca}}$  avec  $\beta > 1$  et  $\omega_0 = \sqrt{\frac{c}{a}}$ , la solution devient :

$$q = A \exp^{(-\beta + \sqrt{\beta^2 - 1})\omega_0 t} + B \exp^{(-\beta - \sqrt{\beta^2 - 1})\omega_0 t} \quad (4.6)$$

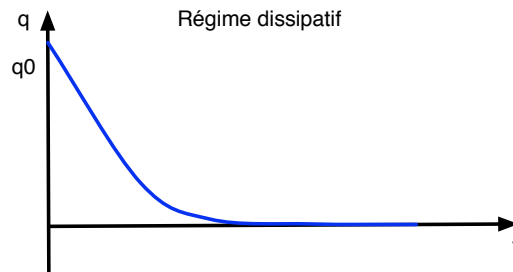


FIGURE 4.5 – Le régime dissipatif d’un système oscillant à un degré de liberté régi par une équation différentielle du second ordre

**4.3.4 La captation du mouvement et l’analyse temporelle**

Pour modéliser le geste à l’aide de l’équation différentielle linéaire présentée ci-dessus, la première étape consiste à mesurer les éléments  $q$ ,  $\dot{q}$  et  $\ddot{q}$  à partir de la position (relative), de la vitesse et de l’accélération du mouvement. Pour ce faire, nous capturons des données gestuelles sous forme de coordonnées de position de la partie du corps dont le mouvement est étudié. Précisément, nous décrivons dans la présente section l’implémentation

de l'analyse du geste à partir d'une captation des coordonnées 2D  $(x, y)$  du centroïde de la main de l'utilisateur à l'aide d'une caméra Microsoft-Kinect. A partir des positions du centre de la main, nous effectuons une analyse temporelle mesurant les deux dérivées premières : la vitesse et l'accélération du mouvement de la main.

L'identification des paramètres permet d'obtenir en temps réel le régime dynamique du mouvement, sa fréquence d'oscillation et son amortissement. La méthode par système dynamique proposée s'affranchit d'une éventuelle couche de traitement du signal qui caractérise les qualités de mouvement grâce à des descripteurs gestuels, puisque l'équation dynamique elle-même joue ce rôle.

### 4.3.5 L'identification des paramètres

L'objectif de la phase d'identification est d'ajuster les paramètres du modèle physique donné par sa formulation analytique, de sorte qu'il génère des dynamiques similaires à celles des données gestuelles provenant de la captation de mouvement. Il s'agit donc d'estimer des paramètres du système dynamique  $(a, b, c)$  qui correspondent le mieux aux données entrantes. Ce problème est bien connu et est appelé identification de système (ang. *fitting*) (Ljung, 1987).

Différentes méthodes peuvent être utilisées afin de mener à bien l'estimation des paramètres (ici,  $(a, b, c)$ ) des équations différentielles homogènes du second ordre. Dans cette thèse, nous avons testé deux méthodes basées sur l'ajustement par les moindres carrés et sur le filtrage particulière. L'avantage de la méthode des moindres carrés est sa simplicité mais son inconvénient réside dans les contraintes liées aux réglages de la fenêtre de calcul. Nous décrivons également une méthode basée sur du filtrage particulière, qui permet d'estimer les paramètres sur un fenêtre qui peut varier dynamiquement. Cependant, la mise en œuvre de la méthode d'identification par filtres particuliers est bien plus complexe.

#### a) La méthode des moindres carrés

La méthode d'ajustement par les moindres carrés permet de sélectionner, parmi la famille des fonctions  $f(q; \theta)$  (ici  $\theta = (a, b, c)$  et  $f(q; \theta) = a\ddot{q} + b\dot{q} + cq$ ) où une ou plusieurs variables muettes  $q$  sont indexées par un ou plusieurs paramètres inconnus  $\theta$ , la fonction qui reproduit le mieux les données expérimentales. La procédure d'ajustement retourne également une estimation indirecte de la valeur des paramètres  $\theta$ .

La méthode des moindres carrées considère que la fonction  $f(q; \theta)$  qui décrit le mieux les données expérimentales, est celle qui minimise la somme quadratique des déviations par rapport aux prédictions de  $f(q; \theta)$  qui sont

données par le modèle connu à priori. Si, par exemple, nous disposons de  $N$  mesures  $(z_i)_{i=1,\dots,N}$ , les paramètres  $\theta$  « optimaux » au sens de la méthode des moindres carrés sont ceux qui minimisent la quantité

$$S(\theta) = \sum_{i=1}^N (z_i - f(q_i; \theta))^2 = \sum_{i=1}^N r_i^2(\theta) \quad (4.7)$$

Les  $r_i(\theta)$  sont appelés les résidus du modèle, et représentent l'écart entre la donnée  $z_i$  observée et la prédiction  $f(q_i; \theta)$ .  $S(\theta)$  peut être considéré comme une mesure de la distance entre les données expérimentales et le modèle théorique qui prédit ces données. La fonction optimale minimise donc cette distance.

Si l'on dispose d'une estimation de l'écart type  $\sigma_i$  du bruit qui affecte chaque mesure  $z_i$ , on l'utilise pour « pondérer » la contribution de la mesure au  $\chi^2$ . Une mesure aura d'autant plus de poids que son incertitude sera faible :

$$\chi^2(\theta) = \sum_{i=1}^N \left( \frac{z_i - f(q_i; \theta)}{\sigma_i} \right)^2 = \sum_{i=1}^N w_i (z_i - f(q_i; \theta))^2 \quad (4.8)$$

Ainsi, si le modèle d'erreur est gaussien (i.e. les erreurs de mesure qui entachent les  $z_i$  sont distribuées suivant une loi normale), la méthode des moindres carrés permet d'estimer quantitativement l'adéquation du modèle aux mesures, pour peu que l'on dispose d'une estimation fiable des erreurs  $\sigma_i$ . La quantité  $w_i$ , inverse de la variance du bruit affectant la mesure  $z_i$ , est appelée poids de la mesure  $z_i$ .

Dans le cas d'une fonction polynomiale  $z = f(q; \theta) = \sum_{k=1}^n \theta_k q^k$ , si nous disposons de  $N$  mesures,  $(q_i, z_i, \sigma_i)$ , nous pouvons exploiter la linéarité du modèle pour exprimer  $\chi^2$  sous une forme matricielle plus simple dont on peut calculer le gradient. Le minimum de  $\chi^2$  est alors atteint pour les  $\theta_k$  qui annule le gradient de  $\chi^2$ .

La longueur fixe  $N$  de la fenêtre utilisée pour l'estimation des paramètres du système dynamique par la méthode des moindres carrés est un point critique. Cette longueur a un rôle important puisqu'une fenêtre trop courte ne permet pas la reconnaissance de mouvement avec une fréquence d'oscillation faible. Au contraire, une fenêtre trop grande peut englober deux régimes différents et écraser les nuances menant à une identification erronée des paramètres. Cette fenêtre peut être fixée par une segmentation préalable du signal. Dans tous les cas, il est nécessaire de prendre garde aux cas limites où les fréquences d'oscillation sont soit trop élevées, soit trop faibles.

### b) Le filtrage particulaire

Le filtrage particulaire peut intervenir en tant que méthode incrémentale pour l'estimation de distributions de probabilités. C'est une méthode d'inférence non exacte pour les réseaux bayésiens dynamiques. Cette méthode a été principalement utilisée, à partir des années 90, dans des applications en temps réel pour le suivi, la localisation et l'alignement d'objets (Handschin et Mayne, 1969, Arulampalam *et al.*, 2002, Comaniciu *et al.*, 2003, Delaert *et al.*, 1999, Doucet *et al.*, 2000) et particulièrement depuis que nous disposons d'une assez grande puissance de calcul pour déployer la méthode en temps réel (Doucet *et al.*, 2000). Cette méthode est très connue dans le domaine de la vision notamment à travers l'algorithme CONDENSATION (Isard et Blake, 1998a,b) où un système dynamique linéaire régit la transition entre un état et le suivant et où l'échantillonnage est effectué à partir de la distribution a priori.

Le filtrage particulaire a également été appliqué par Courty et Arnaud (2008) au problème de cinématique inverse. Ils ont mis en œuvre cette méthode afin de définir un algorithme de contrôle du mouvement en temps réel qui prend en compte un modèle du mouvement a priori.

Dernièrement, le filtrage particulaire a été appliqué pour la reconnaissance adaptative de gestes continus (basés sur des templates) (Caramiaux, 2011). L'algorithme estime des caractéristiques gestuelles (échelle, vitesse, orientation) permettant l'adaptation de la reconnaissance. On peut considérer cette approche comme plus générale que celle des filtres de Kalman.

Nous avons utilisé les filtres particuliers développés par Caramiaux (2011) pour estimer les paramètres du système dynamique du second ordre régissant les dynamiques des composants de *DS/DM*. Généralement, le modèle peut être formulé avec le système dynamique suivant :

$$\begin{cases} \mathbf{u}_k &= f_{\text{TR}}(\mathbf{u}_{k-1}, \mathbf{v}_{k-1}) \\ \mathbf{z}_k &= f_{\text{OB}}(\mathbf{u}_k, \mathbf{w}_k) \end{cases} \quad (4.9)$$

où, au temps discret  $k$ ,

- $\mathbf{u}_k$  représente le vecteur des états du système ;
- $f_{\text{TR}}$  est la fonction (potentiellement non linéaire) qui régit l'évolution de l'état du système suivant  $\mathbf{u}_{k-1}$  et une séquence de bruits indépendants et identiquement distribués (i.i.d.)  $\mathbf{v}_{k-1}$  ;
- $f_{\text{OB}}$  est la fonction (potentiellement non-linéaire) qui génère les observations  $\mathbf{z}_k$ , selon l'état du système  $\mathbf{u}_k$ , et une séquence de bruits i.i.d.  $\mathbf{w}_k$ .

La forme de l'équation (4.9) implique que le processus est Markovien, c'est-à-dire que l'état du système à chaque instant dépend seulement de l'état du système à l'instant précédent. Le problème est donc formulé comme un problème d'estimation et d'adaptation des valeurs de  $\mathbf{u}_k$ .

Le mouvement peut avoir des dynamiques différentes suivant chaque dimension. Par exemple un mouvement circulaire qui oscille en 2D, peut s'amortir graduellement en ordonnée (en aplatissant le cercle graduellement) pour laisser place à une dynamique oscillatoire qui a lieu uniquement en abscisse. Afin de prendre en compte ces cas lorsque le mouvement est capturé en 2D ou en 3D, nous avons choisi de modéliser chacune des dimensions du mouvement par une équation différentielle indépendante. Ainsi, la méthode d'identification par filtrage particulière est alors lancée en parallèle pour identifier indépendamment les paramètres de chacune des équations différentielles régissant le mouvement sur chaque dimension.

#### L'ensemble des états :

Prenons le cas du modèle dynamique linéaire du second ordre :

$$M\ddot{z}(t) + \nu(t)\dot{z}(t) + K(t)z(t) = 0$$

Après la normalisation (pour  $M \neq 0$ ) :

$$\ddot{z}(t) + a(t)\dot{z}(t) + b(t)z(t) = 0$$

Après discrétisation au temps  $k$  :

$$\ddot{z}_k + a_k\dot{z}_k + b_kz_k = 0$$

L'état de notre système est composé des coefficients du modèle dynamique ci-dessus :

$$\mathbf{u}_k = \begin{pmatrix} a_k \\ b_k \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^2$$

#### Les transitions entre les états :

Dans le modèle proposé, la fonction de transition entre les états,  $f_{TR}$  (voir l'équation(4.9)) est linéaire, et donnée par la matrice  $A$  et la distribution de probabilité gaussienne :

$$p(\mathbf{u}_k|\mathbf{u}_{k-1}) = \mathcal{N}(\mathbf{u}_k|A\mathbf{u}_{k-1}, \Sigma) \quad (4.10)$$

Où  $A$  est :

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Et

$$\Sigma = \begin{pmatrix} \sigma_1 & 0 \\ 0 & \sigma_2 \end{pmatrix}$$

$\sigma_i$  régit la vitesse de convergence et la précision de l'estimation (estimation fine ou bruitée).

**La fonction d'observation :**

Dans notre modèle la fonction d'observation  $f_{\text{OB}}$  (voir Equation (4.9)) est choisie pour suivre une distribution gaussienne.

$$p(z_k | \mathbf{u}_k) = C \exp \left( -\frac{\|\ddot{z}_k + a_k \dot{z}_k + b_k z_k\|^2}{2\sigma^2} \right) \quad (4.11)$$

$C$  est la constante de normalisation faisant en sorte que  $\int_{\mathbb{R}} p(u) = 1$  (pour que  $p$  soit une distribution de probabilités). Rappelons que  $z$  est la coordonnée sur une dimension de la cible du geste capturé.

**Inférence des paramètres :**

L'idée des filtres particuliers est de trouver les meilleurs choix des paramètres de  $\mathbf{u}_k$  à chaque itération. Pour cela il s'agit de tester plusieurs (formellement  $N_s$ ) versions de  $\mathbf{u}_k$  :  $\mathbf{u}_k^i$  pour  $i = 1..N_s$  ; et de prendre le meilleur.  $N_s$  est typiquement se situe fréquemment autour de 2000.

$$\mathbf{u}_k^i = \begin{pmatrix} a_k^i \\ b_k^i \end{pmatrix}$$

Pour choisir la meilleure valeur de  $\mathbf{u}_k$  on assigne à chaque  $\mathbf{u}_k^i$  un poids  $w_k^i \in [0, 1]$ . Les poids étant normalisés comme suit :  $\sum_{i=1}^{N_s} w_k^i = 1$ . Les poids représentent des distributions de probabilités sur les valeurs potentielles de  $\mathbf{u}_k$  et sont estimés à partir de la fonction d'observation  $f_{\text{OB}}$ . Le meilleur choix de  $\mathbf{u}_k$  est le plus vraisemblable.

Formellement, nous pouvons utiliser un ensemble de points de support avec leurs poids associés  $\{\mathbf{u}_k^i, w_k^i\}_{i=1}^{N_s}$  pour caractériser les  $p(\mathbf{u}_k | \mathbf{u}_{0:k-1}, \mathbf{z}_{1:k})$ . Ainsi, la « vraie distribution » de l'état du système peut être approchée par une série de fonctions delta de Dirac pondérées :

$$p(\mathbf{u}_k | \mathbf{u}_{0:k-1}, \mathbf{z}_{1:k}) \approx \sum_{i=1}^{N_s} w_k^i \delta(\mathbf{u}_k - \mathbf{u}_k^i)$$

Dans notre cas et avec l'hypothèse Markovienne qui signifie que l'estimation du coefficient actuel dépend seulement de l'estimation du coefficient précédent et de l'observation actuelle, nous avons :

$$p(\mathbf{u}_k | \mathbf{u}_{0:k-1}, \mathbf{z}_{1:k}) = p(\mathbf{u}_k | \mathbf{u}_{k-1}, \mathbf{z}_k)$$

Finalement la valeur de  $\hat{\mathbf{u}}_k$  résultant des mesures aléatoires est calculée ainsi :

$$\hat{\mathbf{u}}_k = \sum_{i=1}^{N_s} w_k^i \mathbf{u}_k^i$$

Ce qui signifie que les coefficients sont calculés ainsi :

$$\hat{a}_k = \sum_{i=1}^{N_s} w_k^i a_k^i$$

$$\hat{b}_k = \sum_{i=1}^{N_s} w_k^i b_k^i$$

Une étape optionnelle de ré-échantillonnage peut être utilisée pour faire face au problème de dégénérescence, commun aux approches de filtrage particulaire. Le ré-échantillonnage est introduit car après un certain nombre d'itérations de l'algorithme d'inférence, seul un petit nombre de particules n'a pas de poids négligeable. Ainsi, il convient de faire appel à une fonction de rééchantillonnage si ce nombre de particules est inférieur à un certain seuil à définir.

L'algorithme décrit ci-dessous, reprend toutes les étapes détaillées ci-dessus d'identification en temps réel de paramètres par filtres particulaires.

---

**Algorithme (filtrage Particulaire) 1** Identification de système en temps réel, étape au temps  $t$  ayant une observation  $z_k$

---

**for**  $i = 1 \dots N_s$  **do**

    Par définition :  $\mathbf{u}_k^i = (a_k^i \ b_k^i)$

$a_k^i := a_{k-1}^i + \mathcal{N}(0|\sigma_1)$  %en additionnant une valeur aléatoire autour de 0

$b_k^i := b_{k-1}^i + \mathcal{N}(0|\sigma_2)$  %en additionnant une valeur aléatoire autour de 0

$p(z_k | \mathbf{u}_k^i) := C \exp\left(-\frac{\|\ddot{z}_k + a_k^i z_k + b_k^i z_k\|^2}{2\sigma^2}\right)$

$\hat{w}_k^i := w_{k-1}^i p(z_k | \mathbf{u}_k^i)$

% en normalisant les poids

$w_k^i \leftarrow \frac{\hat{w}_k^i}{\sum_j \hat{w}_k^j}, \quad \forall i = 1 \dots N_s$

% en calculant la taille de l'échantillon effectif

$N_{eff} \leftarrow \left(\sum_{i=1}^{N_s} (w_k^i)^2\right)^{-1}$

% re-échantillonnage si besoin

**if**  $N_{eff} < \text{seuil de ré-échantillonnage}$  **then**

    ré-échantillonner  $\mathbf{u}_k^1 \dots \mathbf{u}_k^{N_s}$  selon ddf  $w_k^1 \dots w_k^{N_s}$   $w_k^i \leftarrow N_s^{-1} \ \forall i = 1 \dots N_s$

**return**  $\hat{\mathbf{u}}_k = \sum_{i=1}^{N_s} w_k^i \mathbf{u}_k^i$

---



### c) Système dynamique par morceaux

Dans le cas où il est difficile de représenter un phénomène par un système dynamique unique, il est possible d'avoir recours à une modélisation par systèmes dynamiques par morceaux. Un système naturel n'est généralement pas linéaire et il est pertinent de le modéliser par une séquence de systèmes linéaires. Ces méthodes sont souvent appelées *Switching Linear Dynamic Systems* (SLDS). Bregler (1997) a d'abord introduit les SLDS comme plusieurs systèmes dynamiques définissant des classes symboliques et a utilisé un HMM pour modéliser l'émission d'une classe ou la transition entre les classes. Murphy (1998) a défini, par la suite, dans sa thèse, la structure des SLDS comme un commutateur entre filtres de Kalman avec une inférence non exacte. Enfin, Oh *et al.* (2008) ont proposé de nouvelles méthodes d'inférence testées sur le mouvement des abeilles. La modélisation de qualités de mouvement par SLDS n'a pas été traitée dans le cadre de cette thèse, mais constitue toutefois une perspective extrêmement prometteuse pour la reconnaissance de dynamiques complexes et composées.

## 4.4 Méthode 2 : modélisation par apprentissage

La figure 4.6 illustre les étapes principales de la deuxième approche développée dans la thèse. Cette approche permet de reconnaître en temps réel les qualités des composants de *DS/DM* à partir de leurs caractéristiques qualitatives générales sans mettre l'accent sur leurs dynamiques.

La première étape est la captation du mouvement. L'étape suivante consiste à calculer à partir des données gestuelles captées, des descripteurs de qualités de mouvement. Nous combinons cela avec un algorithme d'apprentissage supervisé qui se base sur des exemples de référence étiquetés pour reconnaître automatiquement le geste. Cet algorithme est le suivi de gestes (ang. *Gesture Follower*) (GF) (Bevilacqua *et al.*, 2007, 2011b). Il repose sur une étape de modélisation (hors ligne, dite d'entraînement), où il s'agit de déterminer un modèle des données classées à partir d'exemples de référence. Il repose aussi sur une étape de reconnaissance (en ligne) qui consiste à prédire la classe d'une nouvelle donnée entrante, connaissant le modèle préalablement appris.

### 4.4.1 La captation du mouvement

Cette section présente les résultats obtenus avec une captation basée sur une seule caméra infra-rouge. La motivation de ce choix est de pouvoir capturer le mouvement du corps entier impliqué dans l'exécution des composants de *DS/DM*. Cela correspond à un compromis entre la précision des paramètres de mouvement et certaines contraintes pratiques. En effet, les

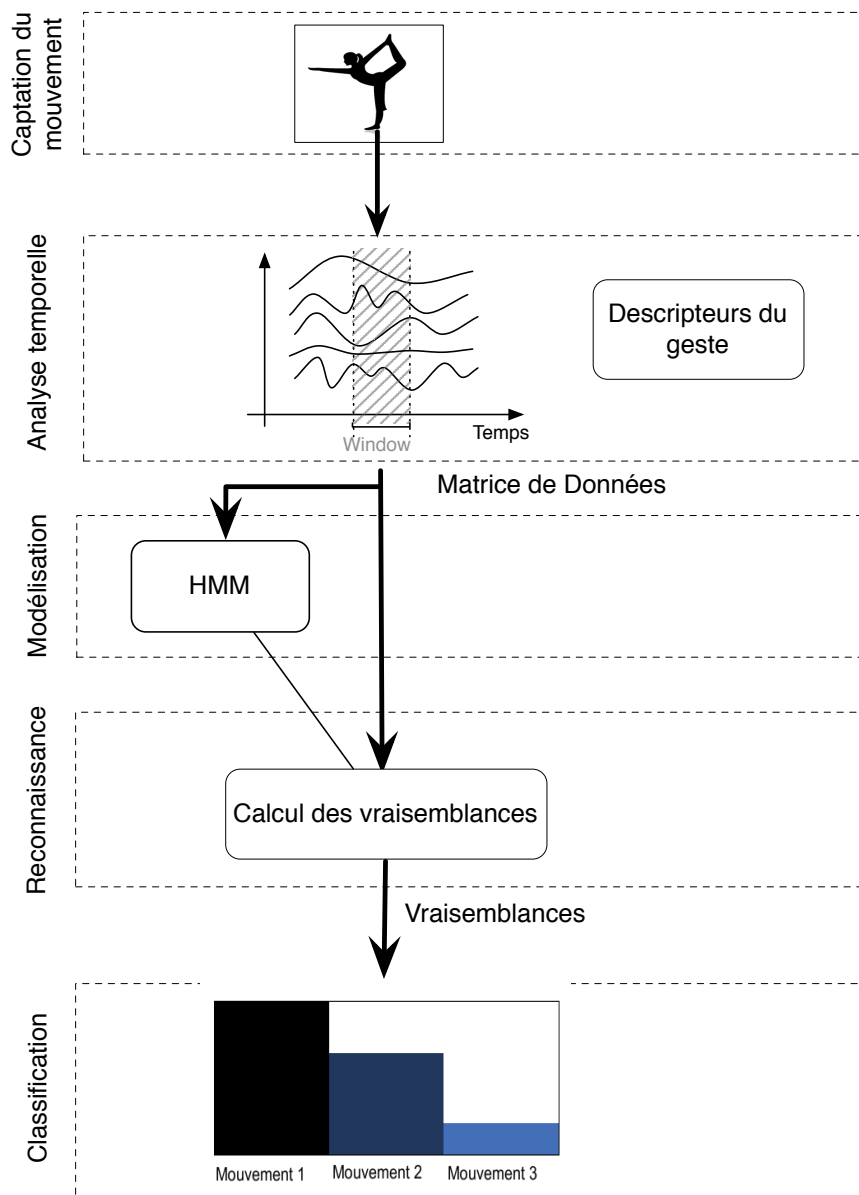


FIGURE 4.6 – Modélisation des qualités de mouvement utilisant le Gesture Follower.

caméras présentent l'avantage d'éviter aux utilisateurs de porter des capteurs. Mais l'inconvénient réside dans le fait que leurs données nécessitent un traitement supplémentaire pour extraire, par exemple, les positions de certaines parties du corps. Dans *DS/DM*, nous avons développé un patch,

en Max/MSP/Jitter utilisant la librairie de traitement d'images cv.jit<sup>3</sup>, pour effectuer une soustraction de fond ainsi qu'une extraction de la silhouette du participant et de certaines caractéristiques géométriques, illustrées dans la figure 4.7, comme sa largeur, sa hauteur, son centre de gravité, sa boîte englobante ainsi que les positions de la tête, des mains et des pieds.

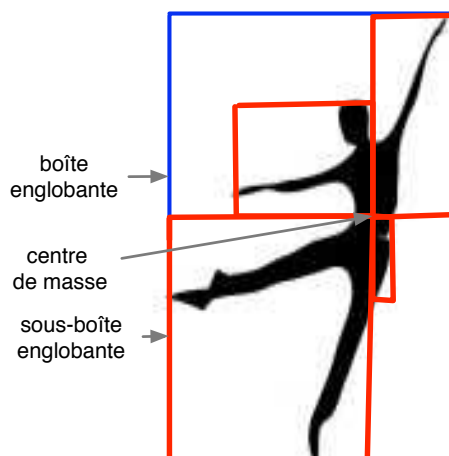


FIGURE 4.7 – Extraction de la boîte englobante et des positions des extrémités à partir de la silhouette captée par une caméra infra-rouge.

#### 4.4.2 Descripteurs gestuels

Dans cette partie nous décrivons les descripteurs que nous utilisons en entrée du GF afin d'adapter l'algorithme à une tâche de reconnaissance de qualités de mouvement.

Ces descripteurs sont calculés à partir des données issues de la captation vidéo de la silhouette et des caractéristiques gestuelles décrites dans la section précédente, telles que la boîte englobante. Pour concevoir ces descripteurs, nous avons organisé des ateliers de conception avec les membres de EG|PC et, particulièrement, Bertha Bermudez. Nous avons développé des descripteurs spatiaux et temporels, à partir des notions géométriques, cinématiques et métaphoriques décrites dans le glossaire de *DS/DM* de Bermudez et Fernandes (2010).

Au lieu d'utiliser des descripteurs généraux inspirés de la LMA, comme c'est le cas dans l'approche proposée par Volpe (2003) et dans le logiciel Eyesweb, nous avons fait le choix de concevoir des descripteurs spécifiques à l'approche chorégraphique de EG|PC et applicables au contexte de

3. Le site Internet de Jean-Marc Pelletier avec cv.jit, accédé le 29/10/2012 : <http://jmpelletier.com/cvjit/>

*DS/DM*. La raison de ce choix est que nos descripteurs permettent au processus de reconnaissance automatique de prendre en compte des nuances très fines des composants de *DS/DM*. Grâce à cela, notre approche permet d'obtenir des résultats de reconnaissance de qualités de mouvement, qu'une approche labanienne, générique, ne permet pas d'obtenir. Notez que les descripteurs décrits ici, peuvent être re-spécifiés dans le cadre d'autres approches chorégraphiques, pour peu que l'on dispose d'une bonne connaissance préalable du vocabulaire étudié.

Nous classons les paramètres du mouvement en deux catégories : les descripteurs *spatiaux* et *temporels*. Les descripteurs spatiaux sont utilisés pour caractériser soit les aspects géométriques du corps, soit la relation du corps à l'espace environnant. Les descripteurs temporels sont utilisés pour caractériser l'évolution temporelle du mouvement.

#### a) Descripteurs spatiaux

1. **La verticalité** : La verticalité est calculée comme le rapport de la hauteur sur la largeur de la silhouette. Une valeur élevée de verticalité indique que l'utilisateur est dans une extension verticale.
2. **L'angle des aisselles** : L'angle des aisselles est calculé comme l'angle séparant l'axe défini par le bras et l'axe vertical défini par le buste.
3. **L'extension** : L'extension est calculée comme la distance maximale entre le centre de masse et l'ensemble des extrémités du corps (mains, pieds, épaules, tête...).
4. **L'ouverture des jambes** : L'ouverture des jambes est calculée comme la distance entre les deux pieds.
5. **Le transfert de poids** : Le transfert de poids est calculé comme la distance entre l'abscisse du centre de masse et le centre du segment défini par les deux pieds.

#### b) Descripteurs temporels

1. **La périodicité et la fréquence** : La périodicité est calculée comme la moyenne du coefficient d'autocorrélation des quatre extrémités délimitant la silhouette. L'autocorrélation statistique est la corrélation entre un signal et ses différentes valeurs à différents moments. Ainsi, lorsqu'un signal est périodique, son autocorrélation est élevée. Dans ce cas-là, il est possible d'estimer sa période et donc sa fréquence.
2. **L'increase/decrease** : Ce paramètre décrit l'évolution temporelle d'un paramètre spatial. Cela revient à déterminer si un certain paramètre augmente ou diminue dans le temps ainsi que son taux de variation.

3. **La quantité de mouvement :** Ce paramètre correspond à la variation dans le temps en termes de pixels de la silhouette captée du participant. Il est calculé à partir de la différence entre les deux images de la silhouette d'une trame à une autre. Ceci détermine la « quantité d'action » dans le temps. Cette grandeur ne représente pas stricto sensu la quantité de mouvement au sens physique, mais c'est une grandeur moyenne qui s'y rapproche. Cela est expliqué dans la thèse de Volpe (2003) qui décrit en détail ce descripteur gestuel.

### 4.4.3 Première phase : la modélisation

#### a) Généralités sur les modèles de Markov cachés

Un modèle de Markov caché (HMM) est un modèle statistique de Markov dans lequel le système modélisé est supposé être un processus de Markov avec des états cachés. Par hypothèse, les observations sont générées par le processus caché, dont chaque état est conditionné par le précédent. La structure temporelle est ainsi encodée à l'intérieur du processus caché, et n'est accessible que par inférence à partir des observations. Chaque état a une distribution de probabilité sur les observations possibles. Par conséquent, la séquence d'observations générée par un HMM donne des informations sur la séquence d'états.

La propriété de Markov requiert que la distribution de probabilité conditionnelle de la variable cachée  $X(t)$  au temps  $t$ , ne dépende que de la valeur de la variable cachée  $X(t - 1)$ . De même, la valeur de la variable observée  $Y(t)$  ne dépend que de la valeur de la variable cachée  $X(t)$ . Ainsi, les probabilités définies dans un HMM sont de deux types. D'une part, les probabilités de transition qui contrôlent le passage de l'état caché  $t$  à l'état caché  $t + 1$ . D'autre part, les probabilités d'observation qui régissent la distribution de probabilité de la variable observée  $t$  étant donné l'état de la variable cachée à  $t$ .

#### b) Le suivi de geste

Dans la deuxième approche explorée pendant la thèse, nous utilisons le suivi de geste (*GF*) qui est un algorithme « d'apprentissage supervisé » développé à l'Ircam par Bevilacqua *et al.* (2010). Ici, le terme apprentissage supervisé désigne le fait de définir un modèle de Markov, à partir d'exemples préalablement étiquetés en classes de gestes prédéterminées. Le formalisme sur lequel se base le suivi de geste s'appuie directement sur celui plus général des HMM, décrit par exemple dans le tutorial de Rabiner (1989). Ce formalisme probabiliste permet de modéliser une série temporelle à partir de probabilités d'émission liées à des états cachés, et aux probabilités de

transition entre états. La vraisemblance d'une série d'observations peut ensuite être estimée grâce à des méthodes d'inférence bayésienne.

En réalité l'approche développée ici, ne repose pas sur un apprentissage statistique effectué à partir d'une grande base de données (en utilisant par exemple l'algorithme de Baum-Welch), comme cela est généralement le cas. Elle se situe plutôt à l'intersection entre l'apprentissage statistique et la reconnaissance basée sur des exemples de référence (ang. *template*), comme les méthodes de « déformation temporelle dynamique » (ang. *Dynamic Time Warping*) (Myers et Rabiner, 1981)

Comme nous sommes dans un cas où les données d'apprentissage sont insuffisantes (d'un point de vue statistique), le GF n'apprend pas automatiquement tous les paramètres du HMM, mais utilise certaines connaissances préétablies sur le système donné. Par exemple, la phase d'expérimentation sur les descripteurs (i.e. les paramètres d'entrée du GF) a permis une estimation de leurs variances initiales, qui sont fixées lors de la phase d'apprentissage. Celles-ci peuvent être réajustées par la suite dans une deuxième phase de test du système (en mode reconnaissance).

### c) entraînement du HMM

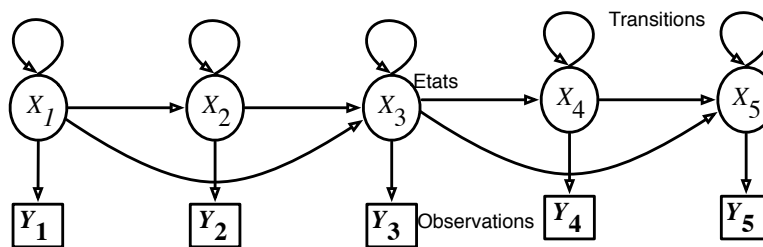


FIGURE 4.8 – Modèle graphique de chaîne de Markov cachée gauche-droite, similaire à celui mis en œuvre dans le GF.

La spécificité du GF par rapport à d'autres systèmes de reconnaissance basés sur des HMM, est qu'il détermine, lors de la phase d'entraînement, une chaîne de Markov cachée de topologie gauche-droite (illustrée dans la figure 4.8) à partir d'un **unique** exemple de référence enregistré. Pour cela, il associe un état caché à chaque trame du signal gestuel de référence. Cette phase d'entraînement réduite est particulièrement adaptée au contexte artistique de la performance, car nous disposons rarement de grandes bases de données d'exemples de gestes classifiés, puisque ces exemples sont généralement très dépendant du contexte artistique et des particularités de chaque interprète. Cette implémentation n'est pas une implémentation standard de HMM. Elle a été initialement pensée pour la problématique d'alignement temporel du geste mais a finalement été utilisée dans bon nombre

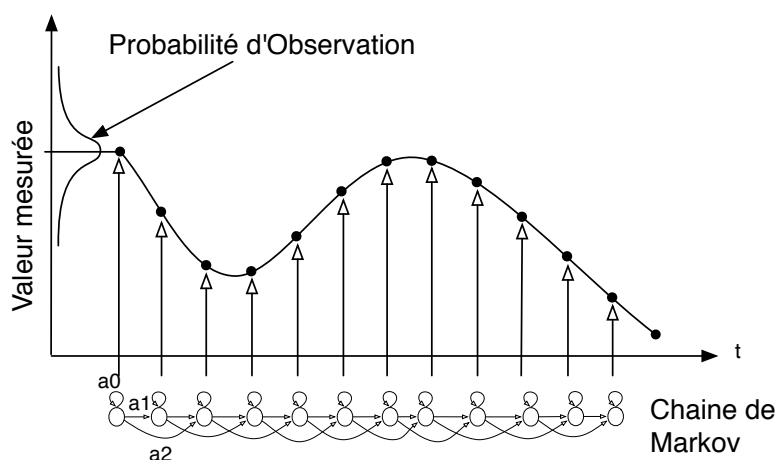


FIGURE 4.9 – L'entraînement du GF : un HMM de gauche à droite est utilisé pour modéliser le geste de référence enregistré

de cas pour des tâches de reconnaissance de gestes (Bevilacqua *et al.*, 2011a). La chaîne générée par le GF lors de la phase d'entraînement est utilisée dans la deuxième phase de test pour comparer une nouvelle donnée au geste de référence enregistré. La figure ci-dessous 4.9 schématise la chaîne de Markov cachée générée pendant cette phase d'entraînement du GF. Chaque  $i^{\text{ème}}$  état émet une observation  $O$  avec une probabilité  $b_i$ , suivant une distribution de probabilité gaussienne aux paramètres  $(\mu_i, \sigma_i)$ .

$$b_i(O) = \frac{1}{\sigma_i \sqrt{2\pi}} \exp -\frac{1}{2} \left( \frac{O - \mu_i}{\sigma_i} \right)^2 \quad (4.12)$$

$\mu_i$  est la  $i^{\text{ème}}$  valeurs de l'échantillon de référence enregistré,  $\sigma_i$  est la déviation standard définissant les différences qui peuvent arriver pendant la performance.  $\sigma_i$  ne peut être estimée à partir d'un seul exemple de référence enregistré. Elle doit donc être définie de manière empirique.

Comme illustré dans la figure 4.9, la chaîne de Markov cachée constituée par le Gesture Follower a une structure particulière puisqu'elle ne permet que des auto-transitions (notées  $a_0$  de  $X_i$  à  $X_i$ ) ou des transitions d'un état caché au suivant (notées  $a_1$  de  $X_i$  à  $X_{i+1}$ ) ou à l'état caché d'après (notées  $a_2$  de  $X_i$  à  $X_{i+2}$ ). Ces probabilités satisfont la propriété :  $a_0 + a_1 + a_2 = 1$ . Comme l'entraînement du GF se base sur un seul exemple de référence, cela ne permet pas d'apprendre avec précision les paramètres correspondant aux probabilités de transitions. Une des spécificités de l'utilisation du GF consiste donc à définir les valeurs des probabilités des transitions sur la base d'une connaissance préalable du vocabulaire de gestes. La discussion qui suit clarifie le rôle de ces paramètres.

1.  $a_0 = a_1 = a_2 = 1/3$  : ce cas correspond à avoir des probabilités égales d'obtenir un geste qui accélère ou qui ralentit par rapport au geste de référence.
2.  $a_0 < a_1$  et  $a_2 < a_1$  : ce cas correspond à une plus grande probabilités d'avoir un geste qui a une vitesse moyenne proche de celle du geste de référence.
3.  $a_0 < a_2$  : ce cas correspond à de plus faibles probabilités de ralentir que d'accélérer.
4.  $a_0 > a_2$  : ce cas correspond à de plus grandes probabilités de ralentir que d'accélérer.

#### 4.4.4 Deuxième phase : la reconnaissance

Durant la phase de reconnaissance, le GF compare le geste entrant à chacun des gestes enregistrés pour chaque classe composant le vocabulaire d'origine. La valeur estimant la similarité entre les données gestuelles en entrée et celles enregistrées pour chaque classe est appelée la « vraisemblance ». Il y a autant de valeurs de vraisemblances estimées que de nombre de classes entraînées (autant que le nombre de chaînes de Markov). A la suite de cela, nous comparons ces valeurs de vraisemblances entre elles. La valeur la plus élevée détermine la classe à laquelle le mouvement en entrée est le plus susceptible d'appartenir.

La phase de reconnaissance de l'algorithme repose sur une procédure d'inférence par algorithme *forward* (voir l'article de synthèse de Rabiner (1989)). Cet algorithme permet d'évaluer, pour un modèle donné, la probabilité  $\alpha_t(j)$  qu'une séquence d'observations partielle  $O_1, \dots, O_t$  ait été générée par le modèle, et que le système soit à l'instant  $t$  dans l'état  $j$ . Cette probabilité est calculée inductivement ainsi :

$\forall j \in [1, N]$

$$\begin{aligned} t = 1 \quad \alpha_1(j) &= \pi_j b_j(O_1) \\ t > 1 \quad \alpha_t(j) &= \left( \sum_{i=1}^N \alpha_{t-1}(i) a_{ij} \right) b_j(O_t) \end{aligned} \quad (4.13)$$

Où  $\pi_j$  est la probabilité d'avoir l'état  $j$  comme état initial,  $b_j$  est la probabilité d'émission de l'observation  $O$  de l'état  $j$ , et  $a_{ij}$  la distribution de probabilités de transition entre l'état  $i$  et l'état  $j$ .

A partir de  $\alpha_t(i)$  on peut calculer la vraisemblance d'une séquence d'observations au temps  $t$  ainsi :

$$Vraisemblance(t) = \sum_{i=1}^N \alpha_t(i). \quad (4.14)$$

La tâche de reconnaissance de gestes consiste alors à déterminer la classe du composant de  $DS / DM$  auquel le geste réalisé est le plus susceptible d'appartenir i.e. le modèle pour lequel nous obtenons la plus grande vraisemblance.



## 4.5 Synthèse comparative

La première méthode de reconnaissance basée sur des méthodes d'identification de paramètres d'équations dynamiques, est une méthode explicite ne nécessitant pas d'apprentissage à partir de gestes de référence enregistrés. De plus, cette méthode s'affranchit d'une éventuelle couche de traitement du signal permettant de caractériser les qualités de mouvement par des descripteurs de plus haut niveau, puisque l'équation dynamique joue elle-même ce rôle. Cette approche reste générale car le modèle physique (simple) que nous avons développé peut être enrichi pour caractériser d'autres qualités issues d'autres vocabulaires gestuels. De plus, la méthode d'identification de paramètres par filtrage particulière est tout à fait générique. Les équations dynamiques peuvent par exemple provenir des modèles du contrôle moteur. Elles peuvent aussi être définies à partir de méthodes cinématiques et/ou dynamiques inverses qui ont en général pour but de déterminer les paramètres physiques d'un modèle en fonction du retour désiré et des contraintes appliquées.

En revanche, la deuxième méthode statistique nécessite d'enregistrer des gestes de référence pour les composants du vocabulaire. Cette méthode peut être vue comme une « boîte noire » qui prend en compte une combinaison complexe d'éléments du geste mais ne permet pas d'avoir une formulation explicite caractérisant les qualités de mouvement. Pour la problématique de reconnaissance de qualités de mouvement, l'utilisation de ce genre de méthodes requiert forcément une couche de traitement du signal pour constituer des paramètres de haut niveau caractérisant les qualités de mouvement. Cette méthode peut donc être utilisée dans divers contextes et avec divers vocabulaires gestuels, même lorsqu'aucune équation explicite caractérisant les gestes du vocabulaire n'est formalisée. Mais cela nécessite de disposer d'exemple de gestes de référence pour entraîner le modèle ainsi que d'une connaissance du vocabulaire suffisante pour élaborer les descripteurs de qualités de mouvement.

## Chapitre 5

# Modèles Physiques pour la Représentation de Qualités de Mouvement

La mise en œuvre de dispositifs interactifs basées sur les qualités de mouvement (QM) qui informent le danseur de ses qualités de mouvement, requiert la réalisation de retours visuels capables de reproduire ou de dialoguer en temps réel avec ces qualités. Nous proposons de répondre à cette problématique en mettant à profit les possibilités offertes par l'informatique graphique en retours visuels basés sur des modèles physiques. Nous utilisons ces modèles pour générer des comportements similaires à des qualités de mouvement du danseur. Nous avons développé dans la thèse deux types de modèles physiques masses-ressorts (ang. *mass-spring systems* (MSS)), le premier est d'échelle fine et le deuxième d'échelle massive. Ces deux différents types de MSS ont été intégrés dans deux dispositifs évalués dans les deux expérimentations détaillées dans les chapitres 7 et 8 ainsi que dans l'annexe A de ce manuscrit.

Les approches exposées dans ce chapitre et utilisées pour la visualisation et le contrôle en temps réel de MSS (fins ou massifs) reposent sur des pré-sets empiriques de paramétrage de modèles physiques.

Les sections qui suivent présentent d'abord une rapide vue d'ensemble de l'utilisation des modèles physiques et particulièrement les modèles masses-ressorts en réalité virtuelle et augmentée. Par la suite, nous expliquerons nos motivations à utiliser de tels modèles puis nous présenterons le formalisme mathématique et l'implémentation sur processeur graphique des MSS. Nous discuterons par la suite les avantages et limitations que présentent ces modèles. Enfin, nous clôturerons le chapitre avec une section sur les méthodes de paramétrage des MSS développées pendant cette thèse.

## 5.1 Vue d'ensemble des modèles physiques en réalité virtuelle et augmentée

Les interfaces offrant des animations basées sur des modèles physiques ont trouvé un terrain fertile pour leur application dans le domaine informatique, et particulièrement en réalité virtuelle et augmentée. La modélisation physique peut être définie comme une approche qui a pour but de simuler des effets visuels dynamiques (les comportements) en prenant en compte les conditions physiques (température, onde, vitesse, etc.) et les interactions qui sont en jeu.

Les modèles physiques qui sont largement utilisés en réalité virtuelle et augmentée sont ceux issus de la mécanique des fluides, les modèles particuliers communément appelés « systèmes de particules », et les systèmes masses-ressorts (MSS).

### 5.1.1 Les modèles de mécanique des fluides

Les modèles de comportement inspirés des équations dynamiques de la mécanique des fluides, tels que ceux de (Stam, 1999), sont la base de plusieurs travaux récents en simulation de fumée, de nuages, de feux ou d'autres phénomènes naturels impliquant les écoulements de fluides. Cependant, ces modèles sont coûteux en calcul et assez difficiles à mettre en œuvre. Dans la plupart des applications en informatiques graphiques, le réalisme du rendu et de l'animation est prioritaire par rapport à la précision physique. A titre d'exemple, des rendus de nuages dans les simulateurs de vol ou les jeux vidéos peuvent être réalisés avec des modèles basés sur les systèmes de particules (Dobashi *et al.*, 2000). L'avantage de systèmes particuliers par rapport aux modèles issus de la mécanique des fluides et reposant sur les équations de Navier-Stokes, c'est qu'ils permettent de simuler des effets physiques d'écoulement des fluides (en particulier les phénomènes turbulents) avec des calculs bien plus simples. Citons à titre d'exemple, le projet CLOUD, auquel j'ai contribué, notamment en mettant en place le système Optitrack de captation de mouvement 3D (ang. *Motion Capture*) utilisé. Delprat *et al.* (2011a,b) y proposent une expérience interactive corporalisée de la matière, où l'utilisateur se transforme en un nuage-avatar qui conserve une forme humaine ou devient une masse trouble sans limites perceptibles. Pour concevoir le nuage-avatar, j'ai aussi encadré deux stagiaires qui ont développé une simulation en temps réel de deux types de nuages à l'aide d'un générateur de particules. Ces modèles interagissaient en temps réel avec le mouvement du corps de l'utilisateur capté.

### 5.1.2 Les systèmes masses-ressorts

Les MSS peuvent être définis comme des graphes non orientés dont les noeuds sont des masses ponctuelles et les arêtes des liens élastiques auxquels les masses sont connectées, qu'on appellera dans ce manuscrit, des « ressorts ». Une masse ponctuelle est un point matériel sans taille utilisé dans la modélisation physique. Le terme « particule » désigne, quant à lui, un point géométrique ayant une taille, utilisé dans la visualisation et dont les coordonnées sont celles issues de la modélisation physique. On appellera « connexion », la liaison entre particules dans la visualisation. Dans un MSS, la dynamique de chaque masse est contrôlée par la somme des forces élastiques issues des ressorts auxquels elle est connectée et des forces issues de l'environnement où elle évolue.

Les MSS sont souvent utilisés en Réalité Virtuelle et Augmentée à travers des logiciels d'animation 3D (Maya, 3DStudio Max, Blender...) pour la modélisation physique du mouvement ou la simulation de déformations d'objets géométriques. Il existe une littérature abondante liée aux nombreux travaux conduits au laboratoire ICA ainsi qu'à l'ACROE en modélisation physique par masses-interactions, concept qui élargit les MSS à des types de liens autres que les liens élastiques. Leurs travaux utilisent la modélisation physique pour la synthèse d'images et l'animation 2D/3D, pour le son, l'acoustique et la musique ou pour l'interaction gestuelle et la perception haptique (Hsieh et Luciani, 2005, Cadoz, 1999).

Les MSS présentent aussi un intérêt dans les applications à destination du monde artistique. Par exemple, des bibliothèques telles que PMPD<sup>1</sup>, ont été développées pour les environnements de développement Pure Data ou Max/MSP/Jitter. Elles sont composées d'un ensemble d'objets externes, qui permettent le contrôle et l'utilisation relativement simple de MSS pour la composition audio-visuelle (Momeni et Henry, 2006) tout en tirant partie des capacités des environnements en termes d'interaction ou de traitement du signal.

Enfin, les MSS ont été explorés pour assurer une cohérence multimodale lorsqu'on parle d'instruments audio-visuels car ils permettent de générer à partir d'un même phénomène physique des retours visuels et sonores. Par exemple, Allegra est un instrument qui permet des effets visuels et sonores à partir d'une captation vidéo de la position d'objets lumineux et offre des rendus et des comportements complexes grâce au mouvement d'un grand nombre de masses-ressorts calculés en GPU. D'ailleurs pour l'élaboration des MSS présentés dans ce chapitre, nous sommes partie de la base logicielle qui avait été développée par Christian Jacquemin pour Allegra (Jacquemin, 2008).

---

1. Cyrille Henry, PMPD : <http://www.chnry.net/ch/?081-Pmpd>

Un autre exemple d'utilisation des MSS pour la cohérence multi-modale est la plate-forme à laquelle nous avons contribué appelée GAVIP (Gestural Audio Visual Interactive Platform)<sup>2</sup>. GAVIP a été développée par six doctorants du LIMSI et de l'Ircam, Baptiste Caramiaux, Marc Rébillat, Tifanie Bouchara, Geatan Parsehian, Matthieu Courgeon et moi-même. Elle a fait l'objet d'une publication dans la conférence international Digital Audio Effects (DAFx-11) (Caramiaux *et al.*, 2011). Notre plate-forme permet de développer des environnements immersifs où l'utilisateur interagit avec des objets spatiaux, audios et visuels en mouvement. Les paramètres sonores, visuels et spatiaux de ces objets sont générés par un même MSS contrôlé en temps réel par le geste de l'utilisateur. Ceci garantit une certaine cohérence dans la synthèse du phénomène spatio-audio-visuel .

Dans notre travail, l'utilisation des MSS a pour objectif d'explorer les parallèles possibles entre les qualités de mouvement du danseur et une visualisation abstraite et métaphorique de leurs comportements.

## 5.2 Motivations

Dans cette section, nous détaillerons les motivations qui poussent à utiliser des MSS pour produire les retours visuels de nos systèmes interactifs.

### 5.2.1 Comportements « physico-réalistes »

Nous définissons dans cette thèse, la notion de « physico-réalisme » par analogie à la notion de « photo-réalisme ». Au même titre qu'un rendu est qualifié de « photo-réaliste » lorsque sa qualité graphique est très élevée et qu'il peut être confondu avec une photographie, nous qualifions le comportement d'un MSS de « physico-réaliste » lorsqu'il génère une dynamique réaliste qui peut être confondue avec celle d'un comportement naturel (telle qu'une dynamique gestuelle). Nous parlerons de similarité entre un comportement de MSS et une qualité de mouvement du danseur, lorsque ce comportement est « physico-réaliste » et qu'il présente une dynamique qui peut être confondue avec la dynamique gestuelle responsable de la qualité du mouvement du danseur. Les MSS peuvent aussi produire des comportements imprévisibles, peu naturels et non « physico-réalistes » si nous modifions leur comportement en choisissant des valeurs non réalistes pour leurs paramètres physiques, comme par exemple des valeurs de viscosité ou d'élasticité négatives. Ce type de comportements non « physico-réalistes » n'est pas exploré dans le cadre de cette thèse.

---

2. Le site Internet de la plate-forme GAVIP, accédé le 29/10/2012 : <http://imtr.ircam.fr/imtr/GAVIP>

Dans cette thèse nous mettons à profit la capacité des MSS à produire des comportements « physico-réalistes » qui semblent naturels puisqu'ils sont régis par les lois de la physique pour représenter visuellement en temps réel des qualités de mouvements dansés. Nous vérifierons que les MSS sont de bons candidats pour produire des dynamiques qui seront associées par les utilisateurs aux qualités de mouvement à l'aide d'une expérience, décrite dans le chapitre 7. Cette expérience a permis d'établir, en fonction des paramètres choisis des MSS, les associations perçues par les utilisateurs entre différentes qualités de mouvement données et la visualisation d'un ensemble de comportements dynamiques de MSS.

### 5.2.2 Rendus abstraits

Lors du rendu des MSS, il est possible d'opter pour une structure topologique et une visualisation réaliste ou abstraite.

Citons des travaux de rendus MSS réalistes issus de la littérature, comme les travaux de thèse de Guilbaud (2002). Dans sa thèse, elle a développé un modèle physico-réaliste et un rendu photo-réaliste de phénomènes naturels de morphogenèse tels que la croissance cellulaire, qui reproduit la dynamique et la forme du phénomène. Pour cela, elle a élaboré des modèles d'écoulements de matière par système physique particulière et conçu des outils pour la représentation visuelle réaliste de ces modèles dynamiques. Citons aussi les travaux de thèse de Hsieh (2007) où il a développé des rendus « masses-interactions » physico- et photo-réalistes issus du formalisme CORDIS-ANIMA, ayant une structure de squelette humain et qui imitent des mouvements dansés. Citons enfin les rendus graphiques développés par Johnston (2009), dans le cadre de sa thèse et qui ont donné lieu à des performances artistiques telles que *Partial Reflexion 3* par exemple. Ses systèmes sont basés sur des MSS permettant de créer du mouvement à partir de structures abstraites non photo-réalistes telles que des cercles, des sphères, des carrés, des cordes Johnston *et al.* (2009). Les choix de rendus MSS que nous avons faits s'inscrivent dans la même optique. Nous créons des structures abstraites qui ne représentent pas un corps ou un squelette car notre objectif est d'utiliser les MSS comme retour réflexif sur les qualités de mouvement et dynamiques de geste du danseur et non sur sa forme corporelle.

### 5.2.3 Capacités de dialogue

Suivant l'échelle et la topologie, les MSS présentent un comportement singulier, qui peut changer en fonction de certains paramètres internes ou externes et qui conduit l'utilisateur à percevoir leur rendu visuel dynamique comme une entité ou une matière vivantes. Cette propriété est utile afin de créer un lien entre l'utilisateur et la visualisation qui sera perçue comme

intrigante et riche car c'est un lien qui se rapproche du dialogue Homme-Homme. Cet aspect sera notamment exploré dans l'expérimentation présentée dans l'annexe A pour créer un lien qui se rapproche du duo en danse entre les qualités de mouvement de la danseuse et les comportements dynamiques de la visualisation d'un MSS.

#### 5.2.4 Large choix de contrôles

Les MSS permettent un large choix de contrôle à travers une grande variété de paramètres de contrôle. Cela permet d'offrir à l'utilisateur des possibilités riches d'interaction en temps réel. Le contrôle gestuel consiste dans cette thèse à associer des paramètres issus du traitement des qualités du mouvement du danseur à des paramètres physiques (tels que les forces appliquées aux masses) qui régissent les comportements d'un MSS. Chaque gamme de paramètres produit des dynamiques différentes. Par exemple, une masse qui rebondit ou une masse qui évolue dans un liquide visqueux.

#### 5.2.5 Cohérence multimédia

L'utilisation des MSS en sortie dans une interface gestuelle permet de contrôler en parallèle des médias différents (comme le son et le visuel) grâce à un même flux de données issues du modèle physique. Cela peut assurer une meilleure cohérence entre ces médias. Par exemple la même simulation physique peut générer des données synthétisées en son ou visualisées. Le phénomène « audio-visuel » est perçu par l'utilisateur avec d'autant plus de cohérence que le son et le visuel sont produits par le même processus physique.

### 5.3 Formalisme des modèles masses-ressorts

Dans cette section nous présentons le formalisme mathématique des MSS. Nous décrivons d'abord les différents types de forces appliquées aux masses. Nous explicitons ensuite l'équation différentielle qui régit leurs mouvements ainsi que le schéma d'intégration utilisé afin de calculer leurs positions.

#### 5.3.1 Les forces

Un MSS est un graphe où des couples de masses peuvent être reliées entre elles par un ressort d'une certaine élasticité et ayant une certaine longueur au repos. Le ressort applique une force élastique sur chacune des masses suivant la loi de Hooke. En plus de ces forces de rappel, les masses sont aussi soumises à des forces issues de l'environnement dans lequel elles

évoluent, telles que les forces de viscosité, de pesanteur ou des forces extérieures.

#### a) La force élastique

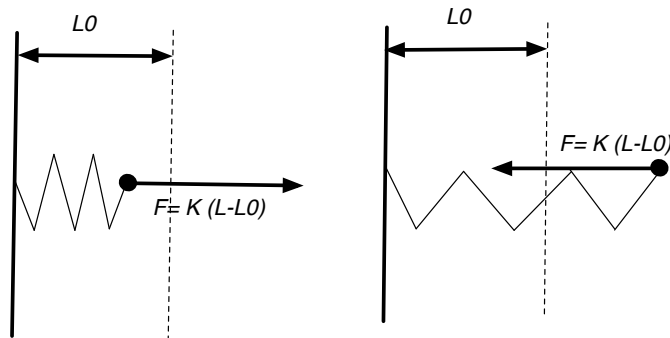


FIGURE 5.1 – La loi de Hooke appliquée à une masse liée à un ressort horizontal

La loi de Hooke stipule que la force élastique est proportionnelle à la raideur  $K$  et à l'élongation  $(|L| - L_0)$  du ressort ( $|L|$  et  $L_0$  représentent respectivement la longueur courante et la longueur au repos du ressort). Cette loi est valable tant que l'élongation ne dépasse pas la limite élastique du ressort. La loi de Hooke, illustrée en figure 5.1 s'écrit comme suit :

$$\vec{F}_{ela} = K(|\vec{L}| - L_0) \cdot \left( \frac{\vec{L}}{|\vec{L}|} \right) \quad (5.1)$$

#### b) La force de viscosité

La force de viscosité appliquée à une masse est opposée et proportionnelle à la vitesse de la masse avec une constante de viscosité  $\nu$  propre à l'environnement dans lequel elle évolue.

$$\vec{F}_{vis} = -\nu \vec{v}(t) \quad (5.2)$$

#### c) La force de pesanteur

Une masse  $m$ , dans un lieu où l'accélération de la pesanteur vaut  $\vec{G}$ , apparaît soumise à une force verticale de pesanteur appelée poids de la masse qui s'exprime ainsi :

$$\vec{F}_{grav} = m * \vec{G} \quad (5.3)$$



#### d) Des forces extérieures supplémentaires

En plus des forces élastique et visqueuse et du poids, une masse peut être soumise à des forces extérieures  $\vec{F}_{ext}$  ou à un champ de forces tel que le champ magnétique, électrique ou rotationnel. Ces forces constantes ou variables permettent de gérer des effets tels que le vent, une déformation extérieure ou une réaction contre un objet fixe ou des bords. Les forces extérieures permettent aussi d'appliquer des contraintes fortes pour ramener une masse à une position désirée.

### 5.3.2 Système oscillant à un degré de liberté

En mécanique, l'équation de la dynamique d'un MSS constitué par une masse, accrochée à un ressort et contrainte de se déplacer dans une seule direction dont le mouvement est régi par une force élastique et une force d'amortissement peut s'écrire comme suit (sur la base de la loi de Newton) :

$$\{ m\ddot{x}(t) = \Sigma F(x(t)) = K(x(t) - x(0)) - \nu\dot{x}(t) + F_{ext}$$

Cette équation peut être écrite sous forme d'une équation différentielle du second ordre avec  $a = m$ ,  $b = \nu$ ,  $c = -k$  et  $d = F_{ext} - Kx(0)$ .

$$\{ a\ddot{x}(t) + b\dot{x}(t) + cx(t) = d$$

Considérons une simplification de l'équation ci-dessus, en prenant la version homogène (sans forces extérieures). La résolution de l'équation aboutit à trois régimes particuliers du modèle linéaire homogène : le régime conservatif où  $b = 0$ , le régime légèrement dissipatif où  $b \neq 0$  et  $b < 2\sqrt{c/a}$  et enfin le régime dissipatif où  $b \neq 0$  et  $b > 2\sqrt{c/a}$ .

L'ensemble des trois régimes d'un système oscillant à un degré de liberté régi par une équation différentielle du second ordre est décrit dans la section 4.3.3.

### 5.3.3 Le schéma d'intégration de Verlet

Nous utilisons dans cette thèse le schéma d'intégration de Verlet du second ordre pour calculer la position de la masse au temps  $t + 1$  en fonction de ses positions aux temps  $t - 1$  et  $t$  et en fonction de l'ensemble des forces (élasticité, viscosité...) auxquelles elle est soumise. Cette méthode repose sur une approximation de la dérivée temporelle  $x'(t)$  à partir de la différence centrée en  $t$  entre  $x(t + \frac{1}{2})$  et  $x(t - \frac{1}{2})$ . Nous formulerons les équations de cette méthode en prenant l'exemple du calcul de la position d'une masse donnée en abscisse  $x$ . Pour alléger la notation,  $x_t$  représente, dans ce qui suit,  $x(t)$ .

La loi de Newton s'écrit :

$$\begin{cases} mx''(t) = \Sigma F(x(t)) \\ x(0) = x_{ini} \end{cases}$$

Dans notre cas,

$$\begin{cases} mx''(t) = F_{ela}(x(t)) + F_{vis}(x(t)) + F_{grav}(x(t)) + F_{ext} \\ x(0) = x_{ini} \end{cases}$$

L'approximation de la dérivée temporelle  $x'(t)$  en dérivée du polynôme d'interpolation basé sur  $x(t + \frac{1}{2})$  et  $x(t - \frac{1}{2})$ , s'écrit :

$$\begin{cases} x'_t = \frac{x_{t+\frac{1}{2}} - x_{t-\frac{1}{2}}}{\delta t} \\ x''_t = \frac{x'_{t+\frac{1}{2}} - x'_{t-\frac{1}{2}}}{\delta t} \end{cases} \quad (5.4)$$

Donc

$$x''_t = \frac{\frac{x_{t+1} - x_t}{\delta t} - \frac{x_t - x_{t-1}}{\delta t}}{\delta t} \quad (5.5)$$

Donc

$$x_{t+1} = 2x_t - x_{t-1} + x''_t \delta t^2 \quad (5.6)$$

En utilisant la loi du mouvement de Newton et en remplaçant  $x''_t$  par la somme des forces sur la masse, on obtient :

$$x_{t+1} = 2x_t - x_{t-1} + \frac{\Sigma F(x_t) \cdot \delta t^2}{m} \quad (5.7)$$

Le schéma d'intégration de Verlet permet donc d'obtenir la position future de la masse à  $t + 1$  en fonction de sa position courante en  $t$ , de sa position passée en  $t - 1$  et de la résultante des forces qui régissent le mouvement de cette masse à l'instant  $t$ .

## 5.4 Implémentation : programmation GPU

Pour implémenter un modèle masse-ressort, il est nécessaire d'effectuer une succession d'opérations de calcul sur les données (ces opérations sont détaillées dans la section précédente). Pour cela, nous réalisons un rendu GPU (Processeur graphique en anglais *Graphics Processing Unit*) du MSS en cinq passes. Chaque passe produit de nouvelles données à partir des données d'entrée ou des données déjà calculées. Les quatre premières passes sont des passes de calcul qui ne produisent pas de rendu graphique visible. Elles utilisent la puissance de calcul parallèle du processeur graphique. Chaque passe consiste à appliquer un *shader de vertex* et un *shader de fragment* pour faire le rendu d'un quadrilatère texturé, pour lequel les textures

sont des tableaux de données. La cinquième passe concerne le positionnement en 3D et l'affichage des éléments graphiques qui représentent les masses et les ressorts.

Il est également possible de sur-échantillonner les passes de calcul pour obtenir un rendu plus fluide. En revanche, il est inutile de sur-échantillonner uniquement la passe de rendu. Car si la fréquence de rendu est plus élevée que la fréquence de calcul des quatre premières passes, certaines données graphiques sont rendues alors qu'elles ne changent pas (puisque les 4 premières passes ne sont pas faites).

#### 5.4.1 Les *shaders*

Les opérations de calcul et cumul des forces, ainsi que la mise à jour des positions des masses sont réalisées par les *shaders de fragments*. Ces *shaders* ont pour but de calculer la couleur de chaque pixel individuellement. Ils prennent en entrée une ou plusieurs textures, des fragments qui définissent les calculs et leur position en sortie, et rendent une image sur un rectangle qui servira de données pour une étape ultérieure. La plupart des opérations standard utilisées en programmation CPU sont disponibles dans les *shaders*, seules les entrées et les sorties sont contraintes. Les éléments géométriques utilisés sont simples, généralement des quads ou des points. Les positions des pixels sont définies par la primitive géométrique et le mode de projection (généralement une projection orthogonale dans le cas d'étapes de calcul et une projection en perspective pour un rendu 3D).

#### 5.4.2 Les textures et les *Frame Buffer Object*

Les données utilisées par les *shaders* sont des textures de dimension  $2^n \times 2^m$  qui encodent des matrices. Pour chaque passe de calcul, les pixels de sortie d'une des passes précédentes sont éventuellement combinés avec les pixels d'une des textures en entrée. Ils sont récupérés dans des textures attachées à des *Frame Buffer Object* (FBO) qui sont reprises par le *shader* suivant. Les canaux RGBA pour chaque pixel d'une texture (ici de taille  $512 \times 512$ ) peuvent contenir jusqu'à 4 informations. Nous introduisons dans ce qui suit les identifiants des textures utilisées dans notre implémentation.

1. Les positions 3D  $(x, y, z)$  précédentes ou courantes ou futures en 3D des masses (au plus  $512 \times 512 = 262144$ ) :  
POSITION-1-TEXTURE ou POSITION-2-TEXTURE ou POSITION-3-TEXTURE
2. Les caractéristiques des ressorts : raideurs, longueurs initiales, coordonnées de texture des masses de droite et coordonnées de texture des masses de gauche qui leurs sont liées :  
EDGE-TEXTURE

3. Les forces en 3D des ressorts :  
FORCE-TEXTURE
4. La somme des forces élastiques en 3D régissant les masses :  
FORCE-MASS-TEXTURE
5. La texture d’habillage des masses et/ou des ressorts pour le rendu visuel des MSS (par exemple une image PNG) :  
DECAL-TEXTURE

### 5.4.3 La méthode centrée arêtes

Dans la thèse, nous avons utilisé comme point de départ, l’implémentation de MSS en GPU basée sur l’approche centrée arêtes de Georgii et Westermann (2005) développée par Jacquemin (2008) pour Allegra. Le développement logiciel élaboré pendant la thèse a consisté à approfondir et à adapter ces MSS à notre problématique et à élaborer des stratégies de contrôle pour leur utilisation dans le cadre des QM interactions.

L’approche centrée arêtes est détaillée dans l’algorithme 2 présenté ci-dessous. Cette méthode a l’avantage de permettre de ne calculer qu’une fois les forces sur chaque ressort et de les appliquer sur les deux masses se trouvant à chaque extrémité, ce qui réduit le nombre d’opérations arithmétiques et d’accès aux textures à effectuer.

Indépendamment du nombre de masses ou de ressorts de la topologie, cette approche centrée sur les ressorts nécessite uniquement quatre passes pour le calcul de la dynamique d’un MSS en plus d’une éventuelle cinquième passe de positionnement en 3D des éléments graphiques et d’affichage des masses et des ressorts. Les quatre premières passes sont résumées dans l’algorithme 2. La quatrième passe représente l’intégration temporelle des positions des masses selon le schéma d’intégration de Verlet explicite ci-dessus.

#### a) La passe 1

Nous utilisons d’abord la texture EDGE-TEXTURE qui stocke les raideurs, longueurs initiales, coordonnées de texture des masses de droite et coordonnées de texture des masses de gauche qui leurs sont liées. Elle permet de calculer les forces des ressorts en fonction de leurs élongations et leurs raideurs dans le shader de fragment (comme montré dans l’équation de Hooke ci-dessus) pour les rendre dans la texture cible FORCE-TEXTURE.

#### b) Les passes 2 et 3

Les passes 2 et 3 ont pour objectif de distribuer les forces calculées pour les ressorts, sur les masses se trouvant à leurs extrémités. Ainsi chacune des

---

**Algorithme (La méthode centrée arêtes) 2** – Les passes de calcul de la dynamique d'un MSS par méthode centrée arêtes ou ressorts

---

```

for  $i = 1 \dots N$  (Nombre de masses) do
  _ initialiser le total des forces  $F_i$ 
for  $j = 1 \dots M$  (Nombre de ressort) do
  | calculer la force du ressort  $F_{i,j}$ 
  | // Cumul des forces sur les masses de gauche et de droite
  | additionner  $F_{i,j}$  au total des forces  $F_i$  de la masse de gauche
  | additionner  $F_{i,j}$  au total des forces  $F_j$  de la masse de droite
  |
for  $i = 1 \dots N$  (Nombre de masses) do
  _ remettre à jour les positions des vertex  $x_i$ 

```

---

masses cumule les contributions des forces des différents ressorts auxquels elle est attachée. Cette opération se fait en deux parties. Nous effectuons le calcul des forces pour les masses de gauche (passe 2) puis le calcul des forces pour les masses de droite (passe 3).

Afin de permettre la distribution et l'accumulation des forces sur la texture FORCE-MASS-TEXTURE en GPU, nous exploitons la puissance de traitement de vertex. Pour chaque ressort, une primitive de type point est rendue deux fois sous forme de rendus cibles. Dans un premier lieu, les primitives sont rendues à la position des masses de gauche pour chaque ressort. Ensuite, la position cible dans la texture correspond aux coordonnées de la masse de droite dans la texture.

Comme les références (leurs positions dans la texture cible) des deux masses liées au ressort sont déjà stockées dans la texture EDGE-TEXTURE, cette structure peut être directement rendue par le vertex shader. Ainsi, les références stockées dans EDGE-TEXTURE sont décodées en points de coordonnées appropriées pour être rastérisées comme les positions dans la texture cible FORCE-MASS-TEXTURE, ce qui permet de cumuler à l'adresse de la masse, la contribution de la force du ressort.

Les forces sont passées au shader de fragment avant qu'elles ne soient cumulées à l'aide de méthode de blending cumulatif dans le rendu cible. De cette façon, plusieurs points sont rendus dans la même entrée d'un rendu cible FORCE-MASS-TEXTURE centré sur les masses. Cela permet finalement de sommer les forces concernant chaque masse et de les rendre dans la texture cible FORCE-MASSE-TEXTURE

**c) La passe 4**

La quatrième passe est une intégration temporelle des positions des masses selon le schéma d'intégration de Verlet. Elle calcule la position des masses à  $t + \delta t$  à partir de la somme des forces appliquées à chaque masse ainsi que de la position courante à  $t$  et de la position précédente à  $t - \delta t$ . Cette tâche est faite dans le fragment shader (le vertex shader sert uniquement à passer les coordonnées de textures dans le quad). Par une opération de permutation circulaire (ou ce qui est appelé une opération de ping-pong cyclique (Cornwall, 2005)) sur trois textures de position, chacune étant attachée à un FBO (la nouvelle position et les deux positions précédentes), on accède aux deux positions antérieures dans le fragment shader. Pour effectuer cette permutation, on change dynamiquement l'attachement du FBO et on utilise les rendus précédents dans un FBO comme textures d'entrée dans une étape ultérieure.

**d) La passe 5**

La passe 5 est une passe d'affichage. Ici, les masses et les ressorts sont modélisés en quad. A la suite de la passe 4, nous obtenons une texture de positions des masses POSITION-1-TEXTURE qui sert de texture de vertex. La passe 5 consiste alors à rendre à l'écran les quads des masses et des ressorts dont les positions sont données dans la texture de position des masses POSITION-1-TEXTURE. Dans la passe 5 nous plaquons la texture DECAL-TEXTURE sur les quads des masses et/ou des ressorts afin de les habiller.

**5.4.4 Les « pour » et les « contre » des masses-ressorts en GPU**

Le grand avantage de l'implémentation des MSS en GPU est de mettre à profit la puissance de calcul théoriquement disponible sur les GPU et très largement supérieure à celle proposée par les CPU les plus rapides. L'efficacité de l'implémentation en GPU nous permet par exemple d'effectuer des calculs de forces et de positions pour un plus grand nombre de masses et de ressorts (autant que la taille des textures utilisées), qu'il ne serait pas possible de traiter par un calcul en CPU avec la même vitesse.

Cependant, la programmation en GPU présente quelques limitations techniques. Tout d'abord, la programmation GPU ne permet pas de lire et d'écrire simultanément sur la même texture. De plus, il n'est pas possible d'accéder en CPU à une valeur dans un FBO sauf en faisant un *readback*. Or, cette lecture est asynchrone et a de ce fait un impact sur la fréquence de rafraîchissement.

De plus, nous avons rencontré certaines limitations de la programmation GPU qui sont liées aux possibilités de contrôle en temps réel. Par exemple,

il n'est pas possible de changer dynamiquement la topologie ou l'échelle d'un modèle lorsque le programme est en cours d'exécution. Cependant, une façon de contourner le problème consiste à supprimer des liens en leur attribuant une force nulle. Plus généralement, il n'est pas possible de changer dynamiquement des paramètres stockés dans une texture sans repasser la texture. Si nous ne désirons pas repasser la texture à chaque trame, et s'il n'est pas nécessaire de modifier chaque élément de la matrice indépendamment, alors il est possible de contourner le problème en additionnant des valeurs entières ou réelles à chaque élément de la matrice stockée dans la texture. De plus, la taille des textures est fixe et cela constitue une limitation en termes, par exemple, de nombre de masses ou de ressorts exploitables dans la visualisation. Afin de contourner ce problème, il suffit de prévoir plus « large » et de concevoir des textures de grande taille même si nous n'en utilisons que des sous-parties pour stocker des données.

Enfin, nous avons aussi eu des problèmes d'instabilité qui faisaient parfois diverger ou disparaître les masses. Ces instabilités sont essentiellement dues à l'approximation faite lors de l'intégration pas à pas. L'approximation devient critique lorsque le déplacement est trop grand entre deux pas et que la dérivée varie beaucoup (entre des valeurs très différentes de la pente du segment). Le déplacement des masses est généralement trop grand lorsque les forces sont trop importantes et devient donc difficile à modéliser avec la fréquence de calcul disponible. Face à ces instabilités, nous préconisons deux solutions. La première solution consiste à réduire les forces en prenant une raideur moins élevée et/ou une plus grande viscosité. Si cela n'est pas possible compte tenu des besoins de la simulation, la deuxième solution consiste à augmenter la stabilité du système en augmentant la fréquence de calcul par rapport à la fréquence d'affichage en effectuant plusieurs fois les passes 1 à 4 entre deux passes 5.

## 5.5 Paramétrage des modèles masses-ressorts

Nous présentons dans cette section l'ensemble des choix de paramétrage des MSS que nous avons explorés afin d'offrir un retour visuel aux danseurs en fonction de leurs qualités de mouvement dans les QM interactions. Ces choix de paramétrage concernent l'échelle, la topologie et la texture des MSS.

### 5.5.1 Choix de l'échelle

Nous définissons l'échelle d'un MSS comme le nombre de connexions élastiques entre les masses. Nous appelons MSS fins, les modèles à petite échelle avec un petit nombre de masses et de ressorts. Nous appelons MSS massifs, les modèles à grande échelle avec un grand nombre de masses et de

ressorts. Nous considérons que l'échelle est massive à partir du moment où la dynamique d'ensemble est perçue au détriment de la dynamique individuelle de chaque masse.

Chaque masse est contrôlée (entre autres) par la somme des forces des ressorts à laquelle elle est connectée. Donc, plus il y a d'interconnexions entre les masses par des ressorts (grande échelle), plus le comportement du système qui en résulte est difficile à contrôler. Il convient donc d'utiliser des modèles fins lorsqu'on désire être en mesure de contrôler précisément le mouvement de chaque masse individuellement à partir du geste du danseur. Cela convient particulièrement pour créer un lien métaphorique de miroir entre les entrées gestuelles du danseur et le retour visuel qui lui est fait par MSS.

Les MSS massifs ont l'avantage de pouvoir générer un mouvement d'ensemble perçu par les utilisateurs comme un matériau extensible ou organique où la dynamique de l'ensemble prime sur la dynamique individuelle. Les MSS massifs conviennent particulièrement pour créer un lien de dialogue avec l'utilisateur.

Ainsi, le choix de l'échelle des MSS est important et peut affecter radicalement la reconnaissance et la perception du modèle par l'utilisateur.

### 5.5.2 Choix de la topologie

Une topologie d'un MSS est un graphe non orienté dont les nœuds sont les masses et les arêtes sont les ressorts. Ce graphe peut être défini par exemple grâce à une matrice d'adjacence ou une fonction d'incidence qui associe à chaque arête une paire de nœuds.

Le changement de topologie affecte radicalement le comportement de l'ensemble des masses-ressorts. Donc, ce choix doit être conduit en fonction de la perception désirée du comportement rendu. Par exemple, pour simuler un tissu, la topologie à choisir est une structure en grille 2D. Il existe différents types de structures topologiques 2D pour réaliser cela :

- Une topologie avec des ressorts en structure de grille où les connexions lient les masses avec leurs 4 voisines directes.
- Une topologie avec des ressorts de cisaillement où les connexions sont diagonales. Cette topologie permet de limiter la déformation oblique
- Une topologie avec des ressorts de flexion où les connexions sont horizontales et diagonales mais sautent les masses voisines. Cette topologie permet de limiter les effets de pliage sur la simulation de tissus.

Nous avons choisi de développer pendant la thèse des topologies de MSS basées sur des structures abstraites car notre objectif principal est de produire des dynamiques liées aux qualités de mouvement. Nous voulons par là nous éloigner de l'imitation exacte du corps en mouvement et explorer



des métaphores abstraites.

Nous décrivons ci-dessous deux types de topologies développées pendant la thèse. Ces topologies sont intégrées dans des dispositifs interactifs et sont évaluées dans les expérimentations décrites dans le chapitre 7, et dans l'annexe A.

### a) Topologie bi-couche pour modèles à échelle fine

Nous avons développé, en collaboration avec la compagnie de danse EG | PC, un premier MSS à échelle fine et à topologie bi-couche (schématisée dans la figure 5.2) pour l'installation *DS/DM*.

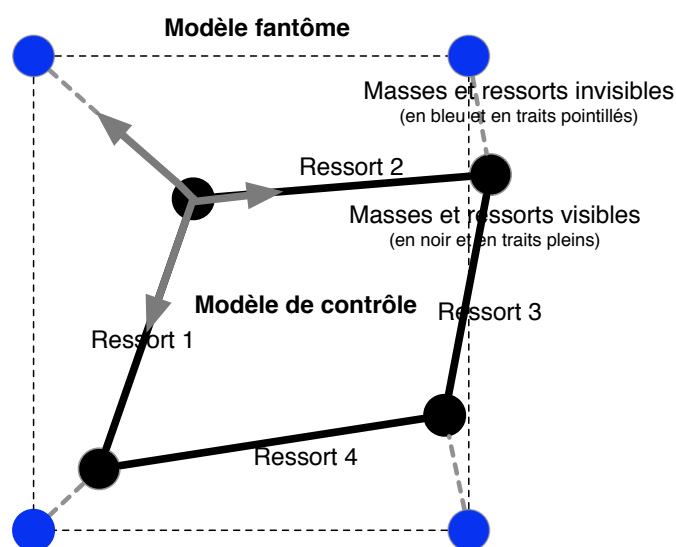


FIGURE 5.2 – La topologie du MSS avec les 4 masses visibles et les 4 masses invisibles.

Nous décrivons la structure topologique en carré permettant de contrôler individuellement le mouvement d'un petit nombre de masses liées à un petit nombre de ressorts. Elle est composée de quatre masses visibles connectées les unes aux autres à l'aide de quatre ressorts visibles formant un carré. De plus, elle est composée de quatre masses invisibles qui permettent de contrôler de façon déterministe les 4 masses visibles illustrées en figure 5.2. C'est une topologie en 2 couches : la couche visible qu'on appelle *le modèle de contrôle* et la couche invisible qu'on appelle *le modèle fantôme*. Cette topologie permet d'avoir *une configuration de référence* et *une configuration active*.

La configuration de référence correspond au moment où le modèle est ramené à une forme initiale carrée (typiquement lorsque le danseur qui interagit avec le modèle est immobile). Cette configuration symbolise la position neutre ou le relâchement en danse. Pour cela nous désactivons les

forces des ressorts visibles du modèle de contrôle et activons les forces des ressorts invisibles du modèle fantôme. Ainsi, les masses visibles peuvent être ramenées à la position de référence en forme de carré.

La configuration active est ce qui permet aux quatre masses visibles du modèle de contrôle et leurs ressorts d'adapter leurs comportements au danseur et de générer des comportements similaires à ses qualités de mouvement.

Pour la conception de cette topologie en carré, nous nous sommes inspirée de la métaphore du miroir qui a une forte connotation historique dans l'apprentissage de la danse. Nous pensons que la comparaison entre le miroir et la structure en carré permet aux danseurs de mieux distinguer les qualités du mouvement et les dynamiques dont les informe le modèle. Car là où le miroir informe le danseur de sa silhouette, notre MSS l'informe explicitement de ses qualités de mouvement.

#### **b) Topologies hiérarchiques pour modèles à échelle massive**

A la suite des MSS à échelle fine, nous avons exploré des MSS à échelle massive. L'objectif de ces modèles à échelle massive est de générer une dynamique de groupe ayant un comportement propre tout en interagissant avec le comportement gestuel du danseur. Pour contrôler des MSS massifs, nous avons développé un type de topologie qu'on qualifie de « hiérarchique ». Cela consiste à organiser les masses et les ressorts en :

- *Un modèle de contrôle* à petite échelle : un MSS fin, visible avec un petit nombre de masses liées à un petit nombre de ressorts.
- *Un modèle fantôme* à petite échelle : un MSS fin, invisible avec des masses fixes liées aux masses du modèle de contrôle. Ce modèle fantôme permet un asservissement du modèle de contrôle. Tout comme pour la topologie bi-couche, il suffit de désactiver les forces des ressorts visibles et d'activer les forces des ressorts invisibles pour ramener les masses visibles à une certaine position de référence (cf le contrôle de MSS fins, détaillé ci-dessus).
- *Un modèle esclave* à grande échelle : un MSS massif auxiliaire visible, avec un grand nombre de masses liées aux masses du modèle de contrôle. Ce modèle auxiliaire est un esclave faible du modèle de contrôle.

Le modèle esclave peut être contrôlé directement ou par le biais du modèle de contrôle qui peut, quant à lui, être contrôlé directement ou par le biais du modèle fantôme. Pour que le MSS ait des comportements réactifs notamment dans le mouvement du modèle esclave, le modèle de contrôle et le modèle fantôme doivent avoir une physique forte, à savoir des masses lourdes et des ressorts puissants, alors que le modèle esclave doit avoir des masses très légères et des ressorts moins élastiques.

Nous avons décliné ce type de topologies hiérarchiques en deux versions. La première version illustrée dans la figure 5.3, propose un modèle de contrôle en topologie carrée et un modèle fantôme calqués sur ceux précédemment développés pour le modèle à échelle fine et topologie carrée. Cette version a été développée dans le cadre de la performance augmentée *Chisseling Bodies* en collaboration avec Marion Cavaillé, danseuse du Ballet National de Marseille. La deuxième version illustrée dans la figure 5.4 propose une topologie simplifiée avec un modèle fantôme comportant une seule masse fixe invisible liée par un unique ressort à une masse visible qui constitue le modèle de contrôle. Cette deuxième version a été développée pour une installation interactive appelée *A Light Touch II* qui a été présentée à la conférence internationale *Designing Interactive Systems 2012* et exposée aux Journées Arts Sciences du festival du Printemps de la culture 2012 de l'Université Paris-Sud.

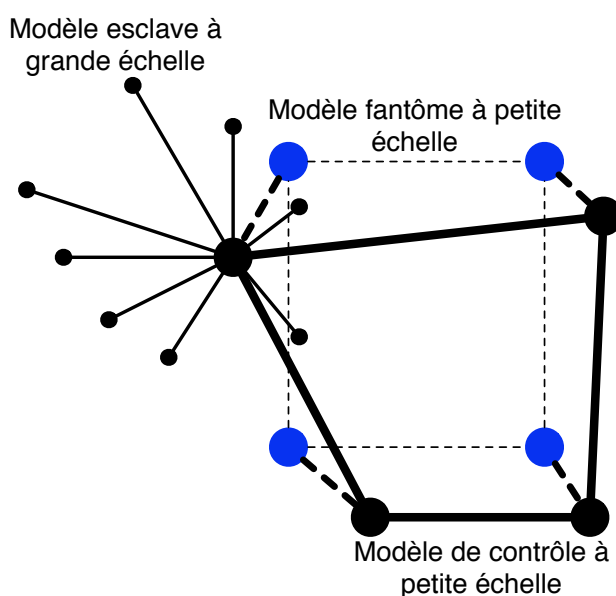


FIGURE 5.3 – Topologie hiérarchique avec modèle de contrôle en carré

Plusieurs raisons motivent le choix conceptuel d'organiser les modèles massifs par couches hiérarchiques.

- Cela facilite le contrôle d'un grand nombre de connexions (dues au grand nombre de masses et de ressorts). Effectivement, il suffit de contrôler les modèles à petite échelle en utilisant des stratégies développées pour le contrôle de MSS fins pour avoir des répercussions sur le modèle massif esclave.
- Par rapport à un modèle non structuré avec un grand nombre de masses (plusieurs milliers), les topologies hiérarchiques permettent d'améliorer la visualisation et la perception des dynamiques du mouvement des

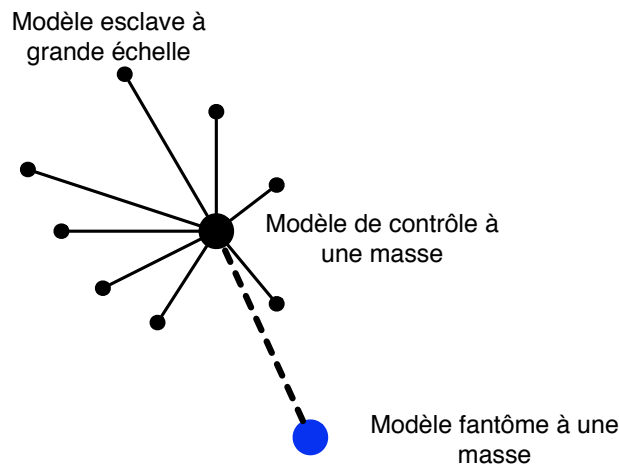


FIGURE 5.4 – Topologie hiérarchique avec modèle de contrôle à une masse

masses. Ainsi, cela garantit la lisibilité de la représentation des qualités de mouvement grâce à la clarté des dynamiques à une échelle fine.

- Cela simplifie la conception de topologies à échelle massive car il est plus simple de manipuler des paramètres individuels à petite échelle du modèle de contrôle ou du modèle fantôme plutôt que les paramètres d'ensemble d'une structure compacte non hiérarchisée.
- Cela permet une conception incrémentale : il est possible d'utiliser les stratégies développées pour le contrôle de MSS fins pour maîtriser le modèle de contrôle et le modèle fantôme d'un MSS massif. Le modèle esclave est suffisamment léger par rapport au modèle de contrôle pour ne pas significativement en modifier le comportement (par rapport à un modèle de contrôle seul sans modèle esclave associé).
- Cela garantit une certaine généricité : un seul modèle de contrôle peut être « paré » de plusieurs modèles esclaves et ainsi avoir des rendus visuels variés pour le même comportement du modèle de contrôle.

### 5.5.3 Choix de la texture

Les masses et les ressorts peuvent être habillés (ou texturés) en superposant une ou plusieurs images à leur géométrie. Le choix de la texture qui habille les masses et/ou les ressorts est important car il agit sur la perception visuelle des MSS. Dans certains cas, pour simuler le comportement d'objets malléables tels que la peau, le tissu ou les cheveux, il peut suffire de concevoir des structures de MSS simples en utilisant une texture ad hoc plutôt que de chercher à reproduire leur comportement à l'aide d'une structure complexe non texturée (Ward *et al.*, 2007). Cela révèle que les aspects d'habillage visuel des MSS grâce aux textures des masses et/ou des ressorts

peut avoir un impact fort sur la perception du modèle.

De plus, et bien que cela ne soit pas exploité dans ce travail, il est envisageable que cette apparence visuelle varie en fonction du temps et/ou des interactions réalisées.

#### a) Exemple de texturage

Pour les deux types de topologies présentées ci-dessus, nous avons choisi de texturer les masses et les ressorts à l'aide de l'image reportée figure 5.5. Le choix de cette image en dégradé de gris est lié à des considérations purement esthétiques. La figure 5.6 illustre le texturage du premier MSS à topologie carrée et échelle fine ainsi que celui du deuxième MSS massif à topologie hiérarchique avec un modèle de contrôle carré. Dans les deux cas, nous avons choisi d'avoir un rendu abstrait avec une esthétique minimaliste : des particules et des connexions blanches avec un dégradé de gris. Ce choix est justifié par l'objectif de se focaliser sur le mouvement même des masses prises individuellement ou dans leur ensemble, donc leur comportement dynamique, plutôt que leur rendu visuel statique.

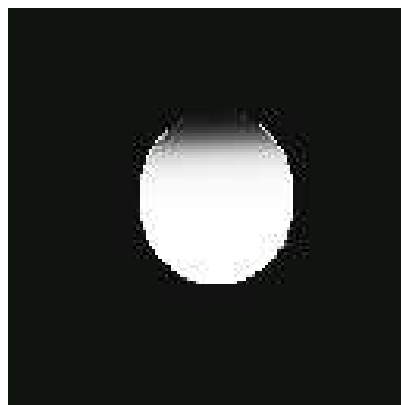


FIGURE 5.5 – L'image utilisée pour texturer les masses et les ressort des MSS fins et massifs.

## 5.6 Stratégies de contrôle des modèles masses-ressorts

Nous présentons dans cette section l'ensemble des stratégies de contrôle des MSS que nous avons développées afin de générer des retours visuels, intégrés dans les QM interactions, qui proposent des comportements similaires (au sens de la similarité entre les MSS et les QM définie à la section 5.2) aux qualités de mouvement des danseurs.

Contrôler le comportement de l'ensemble des masses ou de chaque masse

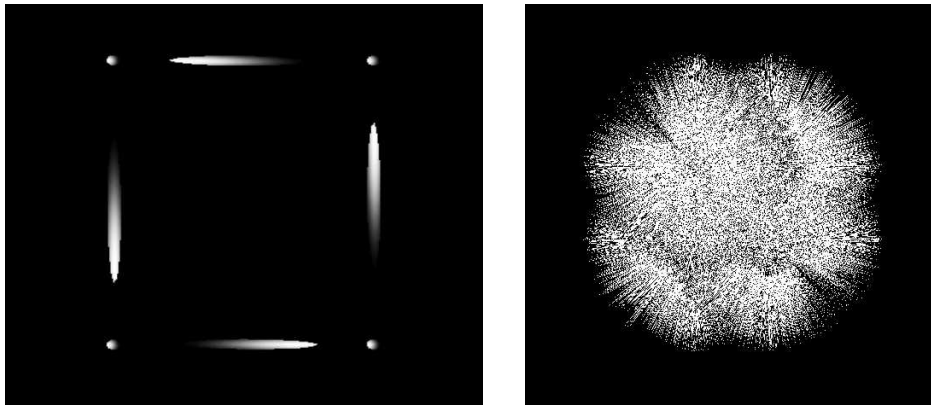


FIGURE 5.6 – Le rendu visuel du MSS fin et du MSS massif.

prise individuellement selon l'échelle des MSS (fine ou massive) et leurs topologies, requiert des stratégies différentes. Cette différence est due, d'une part, aux différents ordres de grandeur des paramètres de contrôle qui varient significativement suivant l'échelle et la topologie du modèle. D'autre part, cette différence est liée à la nature même de la dynamique désirée en sortie : dynamique individuelle pour le MSS fin vs. dynamique de groupe pour le MSS massif. Nous détaillons ci-dessous trois stratégies de contrôle correspondant aux MSS fins et aux deux MSS massifs que nous avons introduits ci-dessus à la section 5.5.

### 5.6.1 Stratégie de contrôle de masses-ressorts fins

Le danseur contrôle le MSS d'échelle fine et de topologie carrée présenté ci-dessus à partir de sa performance des qualités de mouvement de *DS/DM* (Fdili Alaoui *et al.*, 2013). Plus précisément, il agit à travers ses qualités de mouvement sur les paramètres de raideur, de longueur au repos et de viscosité des forces appliquées aux masses ce qui génère différents comportements de MSS. Les stratégies de contrôle, associant les qualités de mouvement du danseur et les paramètres de raideur, de longueur au repos et de viscosité du MSS, sont des pré-sets empiriques que nous avons développés dans le cadre de l'installation interactive *DS/DM* en collaboration avec Bertha Bermudez, danseuse et chercheuse au sein de la compagnie Emio Greco |PC. Nous proposons au lecteur de se reporter au chapitre 3 pour un rappel des principaux composants de *DS/DM* et des qualités qu'ils recouvrent.

Nos pré-sets ont pour objectif de générer des comportements contrôlés par le danseur et associés (ou assimilés) par celui-ci aux composants de *DS/DM* qu'il exécute. Dans cette thèse, nous parlons de similarité entre un comportement de MSS et une qualité de mouvement du danseur lorsque ce comportement est « physico-réaliste » (se référer à la définition de la notion de

« physico-réalisme » donnée à la section 5.2) et que sa dynamique est perçue comme semblable à la dynamique gestuelle du danseur réalisant cette qualité du mouvement. Cette similarité résultant des pré-sets développées pour le MSS fin de *DS/DM* sera validée par la suite lors d'une expérience utilisateur décrite au chapitre 7. Comme indiqué auparavant, l'expérience utilisateur a permis d'établir, en fonction des paramètres choisis pour les MSS, les similarités perçues par les utilisateurs entre les différentes qualités de mouvement des composants de *DS/DM* et les comportements dynamiques de MSS.

Le tableau 5.1 synthétise l'ensemble des associations que nous avons élaborées dans nos pré-sets entre les paramètres gestuels décrivant les qualités de mouvement du danseur et les paramètres des MSS suivant le composant de *DS / DM* qui est exécuté par le danseur et reconnu en temps réel par l'algorithme d'analyse de qualités de mouvement (algorithme décrit dans la section 4.4). Nous avons conçu autant de stratégies de contrôle que le nombre de composants dans *DS / DM* (quatre différentes associations correspondant au *breathing*, *jumping*, *expanding* et *reducing*). L'ensemble des paramètres gestuels caractérisant les qualités de mouvement de *DS/DM* et utilisés dans le mapping est présenté dans la section 8.2.

Composants de <i>DS/DM</i>	Paramètres gestuels	Paramètres physiques
<i>breathing</i>	- Verticalité - Quantité de mouvement	- Longueur au repos des ressorts verticaux du modèle de contrôle - Viscosité de l'environnement
<i>jumping</i>	- Périodicité - Quantité de mouvement	- Raideur des ressorts verticaux du modèle de contrôle - Longueur au repos des ressorts verticaux du modèle de contrôle
<i>expanding</i>	- Quantité de mouvement - Ouverture des jambes - Quantité de mouvement	- Différentes raideurs du modèle de contrôle - Différentes longueurs au repos du modèle de contrôle - Viscosité de l'environnement
<i>reducing</i>	- Transfert de poids - Quantité de mouvement	- Longueur au repos du modèle de contrôle - Viscosité de l'environnement

TABLE 5.1 – L'ensemble des correspondances entre les paramètres du mouvement et les paramètres du MSS pour chaque composant de *DS/DM*.

**a) Contrôle du modèle physique lors du *breathing***

Le *breathing* est un mouvement lent, vertical et répétitif. Pour reproduire une dynamique qui lui est assimilée, il faut que le MSS ait un mouvement exclusivement vertical. Pour cela nous annulons les raideurs des ressorts horizontaux. La raideur commune aux ressorts verticaux (en plus de la constante de viscosité) détermine la dynamique du mouvement de la structure. Nous fixons cette raideur à une valeur faible de sorte que le mouvement reste lent et progressif.

De plus pour reproduire un *breathing in* et un *breathing out*, il faut que les ressorts verticaux alternent entre deux situations : l'étirement et la compression. Nous réalisons cela en faisant alterner la longueur au repos des ressorts verticaux entre deux valeurs fixées empiriquement. L'activation de chacune des valeurs se fait en fonction de la verticalité du danseur. Ce paramètre de verticalité est détaillé dans la section 4.4.2 du manuscrit où il est défini comme le rapport de la largeur sur la hauteur de la silhouette du participant. Quand cette verticalité augmente et dépasse un certain seuil, les ressorts s'étirent et quand elle diminue en deçà d'un certain seuil les ressorts verticaux rétrécissent.

Afin de générer un mouvement symétrique des masses, à l'image du *breathing*, la valeur des raideurs (respectivement des longueurs au repos) des deux ressorts verticaux de droite et de gauche est la même.

Pour reproduire un mouvement lent, la viscosité lors du *breathing* doit être faible mais non nulle. Nous l'associons dans un rapport inverse à la quantité de mouvement du danseur avec un facteur multiplicatif bas.

**b) Contrôle du modèle physique lors du *jumping***

Le *jumping* est un mouvement rapide d'oscillation verticale et répétitive. Pour reproduire une dynamique qui lui est assimilée, il faut que le MSS ait un mouvement exclusivement vertical. Pour cela nous annulons les raideurs des ressorts horizontaux. Etant donné que le *jumping* est un composé sans amortissement, nous annulons la constante de viscosité.

Afin que la dynamique d'oscillation des MSS soit corrélée avec celle du danseur, la fréquence estimée du danseur  $f_{\text{danseur}}$  doit être proche de celle  $f$  des quatre masses du MSS. Pour réaliser cela, nous associons la fréquence du danseur à la raideur des ressorts. Nous utilisons la relation proportionnelle liant la raideur du ressort  $K$  et le carré de la fréquence de la masse  $f^2$  qui lui est attachée. Cette relation est définie à partir de la loi de Hooke appliquée à une masse liée à un ressort :  $\frac{K}{m} = 4\pi^2 f^2$ . Ainsi, pour que la fréquence des quatre masses soit similaire à la fréquence estimée du danseur ( $f = f_{\text{danseur}}$ ), nous définissons de façon empirique une constante multiplicative  $C$  liant le carré de la fréquence du mouvement du danseur et la



raideur verticale des ressorts  $K = C f_{danseur}^2$

De plus pour reproduire une oscillation, il faut que les MSS ne soient jamais en équilibre. Nous réalisons cela en faisant varier les longueurs au repos des ressorts verticaux proportionnellement à la quantité de mouvement. Ainsi, comme le mouvement requis pour exécuter un *jumping* est énergique, les longueurs au repos des ressorts sont toujours élevées ce qui provoque l'oscillation des masses autour de ces longueurs au repos avec une grande amplitude.

### c) Contrôle du modèle physique lors de *l'expanding*

Le mouvement *d'expanding* n'est pas vertical, il évolue dans l'espace 3D avec une énergie importante. Pour reproduire une dynamique qui lui est assimilée nous avons choisi d'associer aux quatre raideurs des ressorts, la quantité de mouvement du danseur. Ainsi, lorsque le mouvement est énergique (grande quantité de mouvement), les raideurs des ressorts sont plus élevées et les masses sont plus excitées et plus réactives.

Dans l'objectif d'informer le danseur de son transfert de poids (élément important de *l'expanding*), il convient d'associer ce paramètre gestuel à l'amplitude du système et donc aux longueurs au repos des quatre ressorts du modèle de contrôle. Ainsi, plus le participant se déplace dans l'espace et transfère son poids plus les longueurs au repos des ressorts sont élevées ce qui maintient une grande amplitude et énergie dans le mouvement des masses autour de ces longueurs au repos.

Une différence importante entre *l'expanding* et le *breathing* est que *l'expanding* est un mouvement asymétrique. Le corps y occupe l'espace en déployant ses extrémités dans toutes les directions possibles et pas uniquement de façon verticale comme dans le *breathing*. Pour mettre cela en exergue dans le comportement des MSS, nous rajoutons des valeurs aléatoires aux valeurs des raideurs et longueurs au repos de chaque ressort du modèle de contrôle de manière à avoir quatre forces élastiques distinctes. Ainsi, nous nous assurons que les masses du modèle de contrôle sont sujettes à des forces élastiques distinctes et ont un comportement asymétrique qui se déploie dans différentes directions.

Enfin, pour que le modèle suive l'énergie du danseur, il est nécessaire de construire une association inverse entre la viscosité de l'environnement et la quantité de mouvement du danseur. Ainsi, la constante de viscosité est faible lorsque le mouvement est énergique (grande quantité de mouvement).

**d) Contrôle du modèle physique lors du *reducing***

Le *reducing* se fait grâce à la métaphore de l'air épais et est clairement expliqué par Emio Greco comme le mouvement d'un danseur évoluant dans un environnement visqueux. La qualité du *reducing* implique que le corps se réduit lentement en créant une résistance à l'air et en s'imaginant flotter dans un air épais. Pour reproduire un *reducing* par MSS, les mouvement des masses rétrécissent vers le centre de l'écran jusqu'à se confondre. Pour réaliser cela, les extensions de tous les ressorts sont mises à zéro. Etant donné que le *reducing* est un mouvement qui évolue dans un environnement extrêmement visqueux, la constante de viscosité est élevée pour simuler un environnement d'air épais qui ralentit le mouvement des masses. Pour cela, nous choisissons la viscosité inversement proportionnelle à la quantité de mouvement du danseur (avec une constante multiplicative élevée).

**e) Contrôle du modèle physique lors du *freeze***

Lorsque le participant se fige (pendant le *freeze*) à la suite du *reducing*, sa quantité de mouvement est très faible. Nous avons conçu un « mapping » de sorte que les MSS se remettent en position initiale, ou, en ce que l'on a appelé dans la section 5.5.2, la « configuration de référence ». Pour cela, nous désactivons les ressorts visibles du modèle de contrôle (leur raideur est fixée à zéro) et activons les ressorts invisibles du modèle fantôme à l'aide d'une très grande raideur permettant de ramener les masses visibles en forme de carré initial ou ce que l'on a appelé « système de référence ». La constante de viscosité, quant à elle, prend une valeur élevée de sorte que les masses se déplacent sans mouvement brusque.

**5.6.2 Première stratégie de contrôle de masses-ressorts massifs**

Nous avons développé une première topologie de MSS massifs et leurs stratégies de contrôle pour la performance augmentée *Chisseling Bodies* en collaboration avec Marion Cavaillé, danseuse au Ballet National de Marseille. Ici, les paramètres issus de l'analyse du geste de la danseuse sont associés aux paramètres de raideur, de longueur au repos, de poids et de viscosité des forces appliquées aux masses. Cela génère des comportements de groupe en réponse au geste qui est en entrée. Le tableau 5.2 synthétise ces associations. L'ensemble des paramètres décrivant computationnellement les gestes sont présentés dans la section A.2.3 de l'annexe A.

**a) Contrôle du modèle physique lors du battement**

Lorsque la danseuse effectue un battement du pied, un « kick » est détecté. Pour reproduire une dynamique brusque qui répond au geste de battement, nous activons les forces du modèle de contrôle en fixant les raideurs

Actions	Paramètres gestuels	Paramètres physiques
Battement du pied	Détection de kick (geste d'impact tels que des battements)	Longueur au repos et raideurs des ressorts du modèle de contrôle
Chute au sol ou saut	Chute	Poids des masses du modèle de contrôle
Extension verticale	Détection de hauteur	Poids des masses du modèle de contrôle
Articulation du bras	Energie main	Raideur et longueur au repos des ressorts du modèle esclave
Alternance arrêt-mouvement	Immobilité	Viscosité de l'environnement et raideur du modèle fantôme

TABLE 5.2 – Les contrôles utilisés pour la performance augmentée *Chisseling Bodies*

et les longueurs au repos des ressorts du modèle de contrôle à des valeurs élevées. Cela crée de fortes perturbations dans le mouvement des masses du modèle de contrôle qui se répercutent sur l'ensemble du MSS, y compris le modèle esclave.

#### b) Contrôle du modèle physique lors du saut ou de la chute

Lorsque le système détecte une chute au sol (respectivement une extension verticale ou un saut) de la danseuse, il active la force de gravité des masses du modèle de contrôle avec une constante de gravité positive (respectivement négative) très élevée. Ceci implique que le modèle de contrôle se déplace vers le bas de l'écran (respectivement vers le haut de l'écran) et embarque dans sa chute (respectivement son ascension) les masses du modèle esclave.

#### c) Contrôle du modèle physique lors de l'articulation du bras

Nous avons associé l'énergie du bras aux paramètres de raideur et d'élongation du modèle esclave. Cette association a pour but de faire correspondre l'amplitude du modèle massif à l'énergie déployée pour articuler le mouvement du bras. Ainsi plus le bras se déploie avec un mouvement énergétique, plus le modèle constitué de milliers de masses et de ressorts remplit l'espace et se déploie en amplitude. Il résulte de cette association des motifs symétriques sous forme de rosaces formées par les masses du modèle esclave et contrôlées par le geste de la main de la danseuse.

#### d) Contrôle du modèle physique lors de l'immobilité

Le contrôle du MSS massif lors de l'immobilité est le même que celui utilisé dans le MSS fin de *DS/DM* pour ramener les masses au système de référence. Ainsi, lorsque le système détecte que la danseuse se fige (sa quantité de mouvement est en deçà d'un certain seuil) les ressorts du modèle de contrôle sont désactivés (leur raideur est fixée à zéro) et ceux du modèle fantôme sont activés à l'aide d'une très grande raideur permettant de ramener les masses du modèle de contrôle à la forme du carré initial ou à ce que l'on a appelé précédemment le « système de référence ». La constante de viscosité quant à elle prend une valeur élevée de sorte que les masses se déplacent sans mouvement brusque. Les masses du modèle esclave sont aussi ramenées au « système de référence » puisqu'elles suivent les masses du modèle de contrôle auxquelles elles sont liées et se repositionnent autour d'elles comme à l'état initial du modèle.

### 5.6.3 Deuxième stratégie de contrôle de masses-ressorts massifs

Le MSS massif à topologie hiérarchique composé d'un modèle de contrôle à une masse est une déclinaison légèrement simplifiée du modèle décrit précédemment. Il a été conçu pour l'installation artistique intitulée *A Light Touch II* qui permet aux participants de contrôler le MSS grâce aux dynamiques (ou qualités de mouvement inspirées par les composants de *DS/DM*) de leurs mains : oscillatoires, oscillatoires légèrement amorties et amorties. Nous proposons au lecteur de se reporter au chapitre 6 pour plus de détails concernant la première version de l'installation *A Light Touch* et à la section 4.3 pour plus de détails concernant la modélisation de ces trois dynamiques à partir du geste du participant.

Ce modèle massif est contrôlé par les trois différentes dynamiques du participant. Comme le détaille la section 4.3, les dynamiques du geste analysées correspondent aux trois régimes d'oscillations d'un MSS constitué d'une masse et d'un ressort. L'idée de *A Light Touch II* est d'associer les paramètres gestuels de fréquence d'oscillation et d'amortissement (paramètre déterminant les dynamiques du geste du participant) et les paramètres des forces élastiques et visqueuses du modèle de contrôle du MSS massif constitué d'une masse et d'un ressort.

Le tableau 5.3 synthétise l'ensemble des associations entre les paramètres gestuels décrivant les dynamiques de la main du participant et les paramètres des forces des MSS massifs.

Les paramètres gestuels de fréquence et d'amortissement utilisés dans le « mapping » de *A Light Touch II* sont donnés en sortie de l'algorithme de reconnaissance de dynamique détaillés section 4.3. Dans le mapping, nous associons, à un facteur multiplicatif près  $C$ , la fréquence du mouvement  $f$  à la raideur  $K$  du ressort du modèle de contrôle suivant la relation propor-

Paramètres gestuels	Paramètres physiques
Fréquence	Raideur du ressort du modèle de contrôle
Amortissement	Viscosité appliquée au modèle de contrôle
Ouverture des bras	Longueur au repos du modèle fantôme
Quantité de Mouvement	Viscosité globale de l'environnement

TABLE 5.3 – L'ensemble des correspondances entre les paramètres du mouvement et les paramètres du MSS pour les trois dynamiques gestuelles qui sont en jeu dans l'installation *A Light Touch II*

tionnelle  $\frac{K}{m} = Cf^2$ , définie à partir de la loi de Hooke (appliquée à une masse liée à un ressort). Nous associons, à un facteur multiplicatif prêt, l'amortissement de la main à une force visqueuse appliquée à la masse du modèle de contrôle. À partir de ces associations, les dynamiques de la masse unique du modèle de contrôle correspondent à celles de la main du participant :

1. Lorsque le mouvement est oscillatoire non amorti, la masse du modèle de contrôle oscille avec la même fréquence sans être amortie. Ceci correspond à la dynamique du premier régime oscillatoire.
2. Lorsque le mouvement est légèrement amorti, alors la masse du modèle de contrôle subit une viscosité proportionnelle qui agit sur son mouvement de sorte qu'elle oscille avant de s'amortir. Ceci correspond à la dynamique du deuxième régime oscillatoire légèrement amorti.
3. Lorsque le mouvement est fortement amorti, alors la masse du modèle de contrôle subit une viscosité proportionnelle qui amortit son mouvement fortement de sorte qu'elle s'immobilise sans osciller. Ceci correspond à la dynamique du troisième régime amorti.

En plus de ces deux paramètres gestuels, nous utilisons un paramètre d'ouverture des bras correspondant à la distance entre les centres des deux mains captées. Nous avons associé l'ouverture des bras à l'élongation du modèle esclave. Cette association a pour but de faire correspondre l'amplitude du modèle massif esclave à l'espace où se déploie le mouvement des bras. Ainsi plus les bras s'écartent et se déploient, plus les milliers de masses et de ressorts constituant le modèle esclave remplissent l'espace et se déploient en amplitude. Ceci dit, le modèle esclave reste toujours lié au modèle de contrôle et sa dynamique globale oscille ou s'amortit en même temps que la masse du modèle de contrôle.

Enfin, nous utilisons encore une fois un paramètre de quantité de mouvement et choisissons de l'associer inversement à la viscosité globale de l'environnement (avec une constante multiplicative élevée). Cette association permet au participant d'immobiliser l'ensemble du MSS (modèle esclave compris) à n'importe quel moment simplement en arrêtant de bouger.

## 5.7 Synthèse

Dans ce chapitre, nous avons présenté une vue d'ensemble de l'utilisation des modèles physiques et particulièrement des MSS en réalité virtuelle et augmentée. Nous avons ensuite discuté nos motivations à les utiliser pour produire des comportements dynamiques visuels dans nos systèmes interactifs. Nous avons décrit leur formalisme mathématique, leur implémentation sur processeur graphique ainsi que leurs avantages et leurs limitations. Ce chapitre décrit aussi l'ensemble des paramétrages de MSS de différentes échelles et topologies, développés pendant notre thèse. Ces MSS ont été intégrés dans des interactions QM afin d'offrir aux danseurs des retours réflexifs sur leurs qualités de mouvement.

Dès lors, La question qui se pose est : « Dans quelle mesure les comportements visuels générés par MSS peuvent être perçus par les danseurs comme similaires à des qualités de mouvement, et ce en fonction du paramétrage choisi ? ». Nous tenterons de répondre à cette question à travers l'étude décrite dans le chapitre 7 de ce manuscrit.



**Deuxième partie**  
**Expérimentations**





## Chapitre 6

# Apport des Qualités de Mouvement comme Modalité d'Interaction

Dans la présente thèse, nous avons mis en œuvre une installation artistique intitulée *A Light Touch* afin de démontrer la pertinence de l'intégration des qualités de mouvement comme modalité d'interaction. *A Light Touch* propose aux participants de contrôler un spot lumineux grâce aux qualités de mouvement de leurs mains. L'idée est de leur donner un espace pour s'exprimer à l'aide de leurs qualités de mouvement et de provoquer différents comportements de l'affichage lumineux. Nous pensons que mettre l'accent sur de telles caractéristiques du mouvement contribue à l'expérience esthétique de l'installation et enrichit l'expérience utilisateur. Pour examiner cela, nous avons mené une évaluation qui a montré que l'interaction basée sur les qualités de mouvement tend à accroître l'expérience utilisateur favorisant des usages exploratoires et expressifs.

Ce chapitre a été publié sous forme d'un article long dans la conférence internationale *Designing Interactive Systems* en 2012 (Fdili Alaoui *et al.*, 2012) et a reçu une mention honorifique.

### 6.1 Question de Recherche

La question de recherche explorée dans ce chapitre est : quels sont les apports en termes d'expérience utilisateur (ang. *User Experience (UX)*), d'une interaction basée sur les qualités de mouvement par rapport à une interaction « directe » ?

Pour répondre à cette question de recherche, nous avons invité des participants à explorer l'installation interactive *A Light Touch* avec deux modes d'interaction différents et avons comparé les expériences utilisateurs de ces

deux modes. Le premier mode d'interaction est basé sur des qualités de mouvement (interaction MQ) et le deuxième mode d'interaction est basé sur un contrôle direct de la position de la lumière (ang. *Position Based interaction* (interaction PB)). L'interaction PB correspond à une relation biunivoque entre la position horizontale de la main et la position horizontale de lumière et entre la position verticale de la main et l'intensité lumineuse. L'interaction QM est présentée en détail dans la section 6.2 de cette thèse.

## 6.2 Implémentation

Pour illustrer notre approche, nous utilisons les qualités de mouvements issues du vocabulaire de *DS/DM* présentées dans la section 3.5, *breathing*, *jumping*, *expanding*, *reducing* (Fdili Alaoui *et al.*, 2012, 2011). Nous modélisons les dynamiques de ces qualités de mouvement et en développons une technique de reconnaissance automatique. Nous utilisons cette technique dans l'installation artistique *A Light Touch* afin d'associer les dynamiques du mouvement des participants aux comportements du spot de lumière projeté en face d'eux.

### 6.2.1 Analyse et captation du mouvement

Comme expliqué dans la section 4.3, les qualités de mouvement de *DS/DM* peuvent être liées aux dynamiques de mouvement régies par un modèle physique spécifique. Nous formalisons ces dynamiques comme suit :

- Le *breathing* et le *jumping* ont une dynamique oscillatoire.
- L'*expanding* a une dynamique oscillatoire légèrement amortie.
- Le *reducing* a une dynamique fortement amortie.

Sur la base de cette formulation, ces qualités de mouvement peuvent être modélisées comme les trois régimes liés à des comportements dynamiques particuliers d'un modèle différentiel linéaire du second ordre. Le but est donc d'ajuster le modèle dynamique (donné par sa formulation analytique au paragraphe 4.3.2) aux données gestuelles entrantes et d'estimer les paramètres les mieux adaptés à ces données. C'est un problème bien connu appelé « identification du système » (Ljung, 1987). Dans le cas des équations linéaires homogènes (comme c'est le cas avec les qualités de mouvement de *DS/DM*), le problème peut être résolu en utilisant une des méthodes présentées dans la section 4.3.5, comme par exemple la méthode des moindres carrés ou celle des filtres particuliers.

Dans l'installation, la captation du mouvement consiste à récupérer le signal des coordonnées 2D du centroïde de la main de l'utilisateur à l'aide

d'une caméra Microsoft-Kinect<sup>1</sup>. A partir des positions du centre de la main, nous calculons les deux premières dérivées : la vitesse et l'accélération. L'identification de paramètres est effectuée grâce à une méthode de filtrage particulière. Elle permet d'obtenir en temps réel le régime dynamique du mouvement, sa fréquence d'oscillation et son amortissement.

### 6.2.2 L'installation interactive *A Light Touch*

Nous avons intégré les qualités de mouvements de *DS/DM*, préalablement modélisées, comme modalité d'interaction en entrée du dispositif interactif implémenté dans le cadre de l'installation artistique intitulée *A Light Touch*.

#### a) Les considérations esthétiques

Comme l'illustre la photo dans la figure 6.1, notre installation permet aux participants de découvrir une interaction QM en contrôlant une tache lumineuse horizontale projetée sur une surface en face d'eux avec les qualités de mouvement de leurs mains. L'idée de cette installation est de fusionner *le tangible* (geste de la main) et *l'intangible* (la lumière). Ici, la notion de *tangible* est liée à la métaphore de « toucher la lumière » qui est à l'origine du nom de l'installation *A Light Touch*. Inspirée par des artistes de la lumière comme Olafur Eliasson<sup>2</sup>, la lumière est utilisée comme un médium révélant la qualité de mouvement et en même temps comme media elle-même. La tache lumineuse est une entité évolutive, vivante et fragile. Sa nature est hétérogène, parfois semblable à une surface qui respire.

Les considérations esthétiques de l'installation ont été motivées par les récents travaux dans l'étude de l'esthétique en IHM. Dans notre installation, l'affichage lumineux engage le spectateur dans un jeu, une relation intrigante, et une improvisation, les trois aspects définis par Petersen *et al.* (2004) comme faisant partie de l'esthétique pragmatique de l'interaction. *A Light Touch* explore le potentiel du *toucher* dans l'expérience esthétique de l'œuvre (Motamedi, 2007). L'installation s'intéresse à la relation entre le participant et l'artefact numérique (Wright *et al.*, 2008) et aux contenus émotionnels de l'expérience (Wright *et al.*, 2008) plutôt qu'à une esthétique de l'apparence (représentée par l'esthétique analytique) (Petersen *et al.*, 2004).

#### b) Les scénarios d'interaction

Dans les scénarios d'interaction, les qualités de mouvement des participants (incorporées dans le *breathing*, *jumping*, *expanding* ou *reducing*) sont

1. Le site Internet de la Microsoft Kinect accédé le 29/10/2012 : <http://www.microsoft.com/en-us/kinectforwindows/>

2. L'exposition FEELINGS ARE FACTS - Olafur Eliasson et Ma Yansong <http://www.claudinecolin.com/fr/archives-526-feelings-are-facts-olafur-eliasson-and-ma-yansong>



FIGURE 6.1 – Photographie de l'installation *A Light Touch*.

en relation indirecte avec trois différents comportements de lumière. Techniquement, les paramètres du mouvement issus de la phase d'analyse des qualités de mouvement sont associés à l'affichage lumineux comme suit :

- le *breathing* et le *jumping* correspondent à un clignotement de la lumière, comme une « respiration ». La fréquence d'oscillation du mouvement correspond à la fréquence de clignotement. L'énergie de mouvement (calculée à partir de la norme de la vitesse de déplacement) est associée à l'intensité lumineuse.
- L'*expanding* correspond à un mouvement de la lumière oscillant, telle une « vague » allant de gauche à droite et convergeant vers le centre. Ceci ressemblerait au mouvement d'une masse attachée à deux ressorts horizontaux de chaque côté. La fréquence de la main est associée à la fréquence de la lumière et l'effet dissipatif estimé est associé à la vitesse de convergence de la lumière vers le centre. L'énergie de la main est mise en correspondance avec l'intensité lumineuse.
- La *reducing* correspond à un mouvement rectiligne de la lumière comme un « balayage » de gauche à droite ou vice versa. L'effet dissipatif estimé est associé à la vitesse de l'évanescence de la lumière et l'énergie de la main est encore une fois associée à l'intensité lumineuse.

### 6.3 Évaluation

Dans cette section nous évaluons l'apport des qualités de mouvement comme modalité d'entrée de l'interaction. Pour ce faire nous avons comparé l'expérience des utilisateurs entre une interaction basée sur des qualités de

mouvement et une interaction directe. Nous avons invité des participants à explorer l'installation *A Light Touch* avec, d'une part, un mode d'interaction basé sur leurs qualités de mouvement (interaction QM) et, d'autre part, un mode d'interaction basé sur un contrôle direct de la position de la lumière (interaction PB). Rappelons que l'interaction PB correspond à une relation directe où la position horizontale de la main est associée à la position horizontale de lumière et la position verticale de la main est associée à l'intensité lumineuse.

### 6.3.1 Dispositif

Le dispositif mis en place dans l'installation *A Light Touch* est illustré dans la figure 6.2. L'espace « tactile » virtuel est constitué d'un cadre carré vide utilisé pour définir une région où les mouvements d'une main sont actifs (voir Figure 6.2). Un capteur 3D de type Microsoft Kinect est placée en face de l'utilisateur. Nous n'utilisons pas le paramètre de profondeur du capteur car nous exploitons les positions de la main dans le plan défini par le cadre. Le capteur envoie le flux de données à une application OpenFrameworks utilisant la bibliothèque de traitement d'image OpenCV, qui isole le mouvement dans la zone d'interaction et extrait le « blob » de la main active. L'application envoie les coordonnées 2D du centre du blob via le protocole de communication OpenSoundControl à l'environnement de programmation en temps réel Max/MSP pour effectuer la reconnaissance des dynamiques du geste. Le programme de reconnaissance est mis en œuvre comme une bibliothèque C++ et interfacé comme un objet Max/MSP. Le contrôle gestuel est aussi traité sur Max/MSP. Il prend en entrée les caractéristiques reconnues du mouvement et donne en sortie les paramètres de la lumière. Le dispositif de lumière est composé de deux rampes LED de type « Martin » avec six lumières chacune, placées en ligne horizontale. Les commandes de contrôle sont envoyées de Max/MSP vers les rampes LED. Deux degrés de contrôle sont disponibles : la position le long de la ligne horizontale de lumière et l'amplitude de chaque spot (considéré comme des points blancs).

### 6.3.2 Les participants

Nous avons recruté 21 participants (7 femmes, 14 hommes, âgés de 24 à 49) pour cette étude. Nous leur avons demandé de répondre à un premier questionnaire, qui donne un aperçu de leur degré de familiarité avec les nouvelles technologies et en particulier, avec les systèmes interactifs. En moyenne, ils étaient tous très familiers avec les ordinateurs et les smartphones, plus ou moins familiers avec les jeux vidéo, Wii, Kinect et les surfaces multitouch et à peine familiarisés avec la captation de mouvement

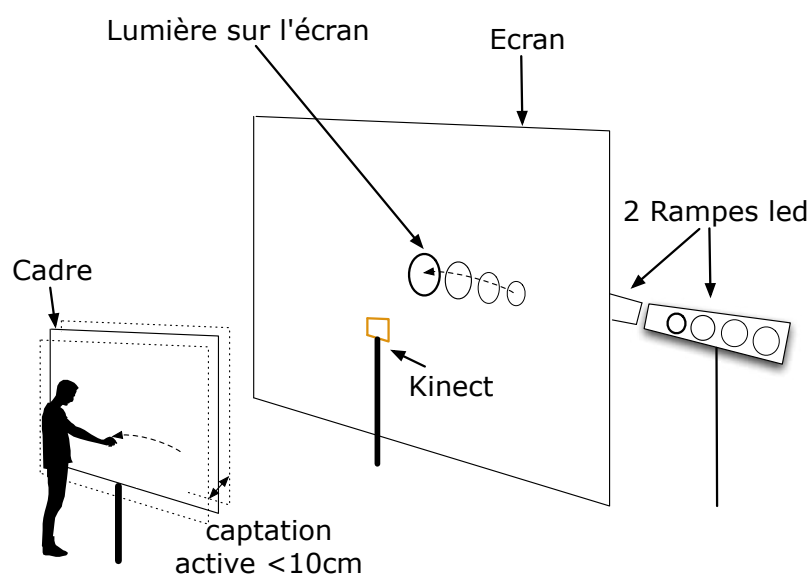


FIGURE 6.2 – Description du dispositif mis en place pour l'installation *A Light Touch*.

et les installations artistiques interactives. Lors de l'expérimentation, il n'y avait pas de public.

### 6.3.3 Procédure expérimentale

Au cours de l'expérimentation, le participant était à l'intérieur de l'espace de l'installation, debout, et l'évaluateur était assis derrière lui/elle. L'expérimentation suit une conception intra-participant, ce qui signifie que tous les participants ont effectué les deux conditions expérimentales et ont exploré deux interactions : PB et QM. Les utilisateurs pouvaient contrôler pendant l'interaction QM le déclenchement du comportement lumineux (trois comportements de la lumière sont disponibles et sont détaillés dans la section 6.2.2), sa fréquence, son amortissement et son intensité.

D'autre part, les utilisateurs pouvaient contrôler pendant l'interaction PB la position horizontale et l'intensité de lumière. Dans l'interaction PB, les utilisateurs pouvaient créer les mêmes comportements lumineux que ceux disponibles dans QM. Il suffisait de reproduire avec l'abscisse de la main la trajectoire et avec l'ordonnée l'intensité du comportement lumineux que le mode QM pouvait proposer. Ainsi, en principe, les mêmes possibilités visuelles étaient réalisables avec le mode PB.

L'ordre des deux techniques d'interaction était aléatoire pour chaque participant. Pour l'interaction PB, nous leur avons donné une explication de l'interaction : « la tache de lumière correspond à la position de la main ». Pour

l'interaction MQ, nous leur avons fait visionner une vidéo de 2 minutes qui contenait des explications sur les trois dynamiques requises pour cette interaction et les comportements lumineux correspondants. Ils ont été invités à explorer les deux interactions autant qu'ils le voulaient. Enfin, après avoir exploré chaque mode, les participants ont été invités à répondre à un questionnaire. Ceci nous a permis de comparer les retours des utilisateurs pour les deux interactions.

#### a) Questionnaire

Nous avons conçu un questionnaire composé de 15 assertions organisées en trois thématiques. Nous avons utilisé les réponses à ce questionnaire pour comparer les deux techniques d'interaction en termes d'expérience utilisateur.

1. La première thématique évalue si l'interaction encourage l'expressivité, la conscience du mouvement, l'exploration du mouvement, et si l'interaction est riche.
2. La deuxième thématique évalue si les mouvements requis dans l'interaction sont intuitifs, naturels, riches et faciles à apprendre et à exécuter.
3. La troisième thématique concerne la relation entre le mouvement et le comportement de la lumière.

Pour répondre au questionnaire, les utilisateurs devaient évaluer les assertions de 1 à 5, où 5 correspond à « fortement d'accord » et 1 à « fortement en désaccord ». Nous avons obtenu pour le questionnaire, un coefficient alpha de Cronbach supérieur à 0,7, ce qui correspond au seuil d'acceptabilité de l'American Psychological Association.

## 6.4 Résultats

Notre objectif est d'évaluer l'expérience utilisateur liée à l'influence des techniques d'interaction : PB par rapport à QM. Nous avons analysé les données avec un test de mesures répétées sur les scores obtenus aux assertions du questionnaire utilisateur. Un t-test avec un seuil de significativité de 0,05 a été calculé sur les scores obtenus pour chaque réponse. Les résultats sont donnés ci-dessous et regroupés par thématique.

Dans l'ensemble, 71,4% des utilisateurs préfèrent l'interaction QM contre 28,6% restants des utilisateurs qui préfèrent l'interaction PB. L'ordre ne modifiait pas cette préférence, ce qui signifie qu'il n'y avait pas de corrélation entre l'ordre et le mode d'interaction préféré des utilisateurs.



### 6.4.1 L'expressivité, la richesse de l'interaction, la conscience et l'exploration du mouvement

L'exploration a révélé	PB moyenne (écart Type)	QM moyenne (écart Type)	Rejet H0 ( $P < 0.05$ )
L'expressivité de l'installation	3.0 (1.1)	3.7 (1.0)	H0=1, P=0,03
L'expressivité de la lumière	3.2 (0.9)	3.7 (0.9)	H0=0, P=0,12
La conscience du mouvement	3.5 (1.2)	3.8 (0.9)	H0=0, P=0,32
L'exploration du mouvement	2.4 (1.4)	3.5 (1.4)	H0=1, P=0,01
La richesse de l'interaction	2.4 (1.1)	3.5 (0.8)	H0=1, P=0,00

TABLE 6.1 – Les résultats relatifs à l'expressivité, la richesse de l'interaction, la conscience et l'exploration du mouvement dans les interactions PB et QM.

Le tableau 6.1 montre les retours des utilisateurs concernant l'expressivité de l'installation et de la lumière, la conscience du mouvement et l'exploration du mouvement ainsi que la richesse de l'interaction. Les moyennes, les écarts types et les résultats du t-test pour chacune des cinq assertions ont été calculés (il y avait 21 scores pour chaque technique d'interaction et chaque assertion).

#### a) L'expressivité

Tout d'abord, les utilisateurs considéraient toute l'installation (retour lumineux et interaction) significativement plus expressive dans le mode QM que dans le mode PB ( $H_0 = 1$ ,  $p = 0,0375$ ). Cependant, aucune différence significative entre les deux modes QM et PB n'a été trouvée concernant l'expressivité du rendu lumineux seul (moyenne globale = 3,5). Bien que les correspondances entre les mouvements des utilisateurs et des comportements aient été différentes dans QM et dans PB, nous pensons que les utilisateurs ont trouvé le rendu lumière tout aussi expressif dans les deux modes car la nature intrinsèque du retour lumière était semblable dans les deux modes. Cela confirme que les différences perçues entre les modes QM et PB sont dues aux modalités d'interaction et non au retour visuel de la lumière.

#### b) La conscience du mouvement

La prise de conscience du mouvement induite dans l'interaction n'était pas significativement différente entre les deux modes d'interaction (moyenne globale = 3,7). Cette absence de différence significative pourrait être liée

au fait que plusieurs utilisateurs n'étaient pas familiers avec le concept de conscience du mouvement (utilisé dans la pratique de la danse).

### c) L'exploration du mouvement

Les utilisateurs considèrent que le mode QM les a encouragé à explorer significativement plus de mouvements nouveaux et différents, que dans le mode PB ( $H_0 = 1, p = 0,0125$ ). Cela a également été soutenu par le fait que les participants ont passé en moyenne plus de temps à explorer le mode QM (moyenne globale = 5min) que le mode PB (moyenne globale = 1min).

### d) La richesse de l'interaction

Nous avons analysé les résultats relatifs à la richesse de l'interaction. Le mode QM semble fournir une interaction significativement plus riche que la stratégie directe proposée dans le mode PB ( $H_0 = 1, p = 0,0025$ ). Cette richesse pourrait être liée au résultat précédent, à savoir que le mode QM encourage d'avantage l'exploration du mouvement.

## 6.4.2 Qualifications du mouvement

Les mouvements sont	PB moyenne (écart Type)	QM moyenne (écart Type)	Rejet $H_0$ ( $P < 0.05$ )
Faciles à apprendre	4.5 (0.6)	3.3 (1.1)	$H_0=1, P=0,00$
Faciles à exécuter	4.7 (0.5)	3.5 (0.9)	$H_0=1, P=0,00$
Naturels	3.5 (1.2)	2.9 (1.2)	$H_0=0, P=0,10$
Intuitifs	3.7 (1.0)	3.0 (1.0)	$H_0=0, P=0,07$
Riches	2.3 (1.1)	3.2 (1.1)	$H_0=1, P=0,01$

TABLE 6.2 – Les résultats relatifs à la facilité d'apprentissage et d'exécution, la qualité naturelle, intuitive et la richesse des mouvements requis dans les modes PB et QM.

Dans cette section, l'évaluation a porté sur les aspects moteurs liés aux mouvements (l'apprentissage et l'exécution) ainsi que son caractère naturel, intuitif et sa richesse. Le tableau 6.2 présente les moyennes, les écarts types, et les résultats des t-test obtenus à partir des 21 scores pour chaque technique d'interaction et chacune des cinq assertions de cette thématique.

### a) La facilité d'apprentissage et de réalisation des mouvements

Les utilisateurs ont trouvé les mouvements de la main significativement plus faciles à apprendre dans le mode PB que le mode QM ( $H_0 = 1, p =$

0,0001). De plus, les utilisateurs ont estimé que les mouvements sont significativement plus faciles à exécuter dans le mode PB que le mode QM ( $H_0 = 1, p = 0$ ). Ces deux résultats fournis dans le tableau 6.2, indiquent que l'exécution des qualités de mouvement exige un processus d'apprentissage et de formation approfondi.

#### b) Les mouvements sont naturels, intuitifs, riches

Les utilisateurs ont trouvé que les mouvements étaient naturels (moyenne globale = 3,2) et intuitifs (moyenne globale = 3,3), sans différence significative entre les deux modes d'interaction. Toutefois, les mouvements ont été perçus significativement plus riches dans l'interaction QM ( $H_0 = 1, p = 0,0119$ ) que dans l'interaction PB. Les deux derniers résultats semblent indiquer que la perception de la facilité du mouvement requis est contrecarrée par une perte de sa richesse. Il faut donc trouver un compromis pour impliquer dans l'interaction des mouvements intuitifs et naturels sans qu'ils perdent pour autant de leur richesse.

#### 6.4.3 Relation entre la main de l'utilisateur et la lumière

La relation entre la main des utilisateurs et le retour lumière	PB moyenne (écart Type)	QM moyenne (écart Type)	Rejet $H_0$ ( $P < 0.05$ )
Ne mime pas la trajectoire de la main	2.1 (1.1)	3.7 (1.1)	$H_0=1, P=0,00$
Permet un relation entre les qualités de mouvement et le comportement de la lumière	3.2 (1.0)	3.9 (0.9)	$H_0=1, P=0,04$
Est intéressante	3.8 (0.9)	4.2 (0.8)	$H_0=0, P=0,13$
Est intuitive	4.0 (0.9)	3.1 (1.1)	$H_0=1, P=0,00$
Est intrigante	2.9 (1.4)	3.9 (1.1)	$H_0=1, P=0,01$

TABLE 6.3 – Les résultats relatifs à la relation entre le mouvement de la main des utilisateurs et le retour lumière dans les modes d'interaction PB et QM.

Ici, nous examinons la relation perçue par les participants entre la modalité d'entrée (qualités de mouvements ou positions) et la modalité de sortie (rendu lumineux), qu'elle soit « mimétisme » ou « dialogue ». De plus, nous examinons si cette relation est perçue par les participants, comme « intéressante », « intuitive » ou « intrigante ». Le tableau 6.3 présente les moyennes, les écarts types, et les résultats du t-test pour chacune des cinq assertions obtenues à partir de 42 scores (21 score par mode d'interaction). Nous détaillons les résultats ci-dessous.

**a) Mimétisme ou dialogue**

Les résultats étaient cohérents avec les hypothèses sous-jacente à la conception des deux modes d'interaction. Les participants ont trouvé que le rendu lumineux imitait significativement moins la trajectoire de la main dans le mode QM que dans le mode PB. Les scores étaient significativement distincts entre les deux interactions ( $H_0 = 1$ ,  $p = 0$ ). Les participants ont nettement mieux expérimenté la relation entre les qualités de mouvement de leurs mains et les comportements de la lumière dans le mode QM que dans le mode PB ( $H_0 = 1$ ,  $p = 0,0405$ ).

**b) Description de la relation**

Pour les deux modes d'interaction, les participants ont trouvé le rapport entre leurs mains et le retour lumière « intéressant » (moyenne globale = 3,9). Ils ont trouvé que la relation avec le retour lumineux est significativement plus intuitive lorsque le spot lumineux suit la position de la main, dans le mode PB ( $H_0 = 1$ ,  $p = 0,0066$ ). Cependant, ils ont trouvé que l'utilisation de qualités de mouvement fournit une relation avec le retour lumineux significativement plus intrigante ( $H_0 = 1$ ,  $p = 0,0178$ ).

**6.5 Discussion et conclusion**

Dans cette expérimentation nous avons étudié les avantages de la conception d'interactions basées sur les qualités de mouvement par rapport à une interaction basée sur des relations directes entre les positions de la main et des visuels lumineux. Nos résultats indiquent qu'incorporer des qualités de mouvement dans les interactions contribue à leur richesse et favorise l'expressivité et l'exploration du mouvement. Les qualités de mouvement fournissent un vocabulaire plus riche d'interaction (mais semblent plus difficiles à apprendre et à exécuter). Elles fournissent une relation de dialogue, intrigante, mais moins intuitive entre le mouvement des utilisateurs et les modalités de sortie.

Ce résultat est cohérent avec le temps, bien plus élevé, passé par les utilisateurs dans le mode d'interaction prenant en compte leurs qualités du mouvement. Car même si, en principe, les mêmes comportements visuels pouvaient découler des deux modes d'interaction, les utilisateurs n'ont que très peu exploré ceux du lien direct. Par contre, ils ont davantage exploré les différentes dynamiques mises en jeu dans le mode basé sur les qualités de mouvement tout en regardant l'écran et la réponse visuelle de la lumière. Ainsi, la durée passée dans l'installation ne peut pas être attribuée au retour visuel seul. Elle peut être expliquée par l'intérêt accru suscité par la grande gamme des possibilités offerte par l'interaction elle-même.

Notre étude a également montré que les mouvements où il faut réaliser des qualités de mouvement ne sont pas aussi faciles à apprendre ou à effectuer que des mouvements simples et habituels. Cela peut être lié au fait que nous sommes aujourd'hui habitués à utiliser des technologies qui mettent en œuvre des contrôle continus, avec des gestes simples (par exemple dans les smartphones et les surfaces tactiles). Effectivement, nos utilisateurs n'avaient que peu d'expérience de l'expression corporelle requise dans des installations artistiques interactives. Néanmoins, ils sont d'accord sur la « richesse » fournie par les qualités de mouvement.

L'utilisation de qualités de mouvement dans l'interaction implique une réponse du système qui est légèrement retardée. En effet, le système doit intégrer les variations de mouvement sur une fenêtre de temps. Le système se comporte comme ayant une mémoire à court terme. Cela crée une situation qui peut être appréhendée par l'utilisateur plus comme un « dialogue » qu'un « contrôle » : le système semble deviner une « intention » de l'utilisateur.

Notons que les deux modalités d'interaction présentées dans cette étude peuvent être liées à la distinction entre deux paradigmes d'interaction rapportées par Beaudouin-Lafon (2004) : l'ordinateur-comme-outil (mapping des paramètres) et l'ordinateur-comme-partenaire (qualités de mouvement).

Enfin, une des limitations reportée par les utilisateurs se situe au niveau de l'expressivité de l'artéfact visuel offert comme retour dans l'installation *A Light Touch*. Ils ont considéré que la lumière, ayant une dynamique spatiale unidimensionnelle (en plus de la dimension d'intensité lumineuse), ne rend pas compte de toute la richesse du geste en entrée. Cette limitation nous a amené à considérer la génération de comportements dynamiques visuels plus complexes grâce à des modèles physiques tels que les modèles masses-ressorts. L'expérimentation qui suit présentée dans le chapitre 7 explore les possibilités visuelles qu'offre ce genre de modèles physiques en vue de la mise en place de retours expressifs dans les interactions QM. Cela nous a permis de développer une deuxième version de l'installation, appelée *A Light Touch II*. Dans la deuxième version, nous avons modifié le retour visuel en utilisant des visualisations basées sur des modèles physiques masses-ressorts massifs contrôlés en temps réel par les qualités de mouvement de l'utilisateur (les mêmes qualités de mouvement que celles qui sont en jeu dans la première version de l'installation). *A Light Touch II* a été présentée en démonstration à la conférence internationale *Designing Interactive Systems 2012* et a été exposée aux Journées Arts Sciences du festival du Printemps de la culture 2012 de l'Université Paris-Sud. Le lecteur intéressé peut se reporter à la section 5.5 qui détaille les différents paramètres des modèles physiques utilisés dans *A Light Touch II*.

## Chapitre 7

# Classification des Comportements Dynamiques de Modèles Masses-Ressorts

### 7.1 Question de recherche

Dans ce chapitre, nous nous intéressons aux visualisations capables de fournir à l'utilisateur un retour réflexif sur ses qualités de mouvement. De tels retours visuels permettent à l'utilisateur de percevoir, maîtriser et/ou augmenter son exécution des qualités de mouvement. Ils peuvent donc être appliqués, entre autres, dans les contextes de l'apprentissage, de la pédagogie, de la rééducation, de l'interaction et/ou de la performance.

Nous présentons dans ce chapitre une étude élaborée dans le contexte de la pédagogie de la danse, qui évalue la capacité d'un visuel par Modèle Masses-Ressorts (MSS) à générer des comportements perçus comme similaires à des qualités de mouvement, en fonction du paramétrage choisi. Cette étude se base sur le paramétrage du MSS que nous avons développé pour l'installation *DS/DM* en collaboration avec la compagnie de danse EG|PC (Fdili Alaoui *et al.*, 2013). Précisément, l'étude présentée dans ce chapitre évalue l'influence du paramétrage du MSS sur la capacité des participants à classifier les comportements visuels comme des qualités de mouvement de *DS/DM*. Ce qui nous informe sur la qualité du retour visuel dans des applications d'apprentissage ou de maîtrise du geste expert en danse.

### 7.2 Comportements

Nous évaluons l'influence du paramétrage sur la classification des comportements des MSS en qualités de mouvement de *DS/DM*. Pour ce faire, nous générons un ensemble de comportements de MSS correspondant à

différents pré-sets du modèle. Ces pré-sets sont des variations contrôlées des paramètres de raideur, de la longueur au repos de chaque ressort ou de l'ensemble des ressorts du modèle de contrôle ainsi que de la viscosité de l'environnement.

### 7.2.1 Rappel du MSS fin à topologie carrée

Le MSS développé pour l'installation interactive *DS/DM* et utilisé dans cette étude, est d'échelle fine et de topologie carrée. Nous rappelons que l'échelle d'un MSS représente le nombre de connexions élastiques entre les masses. Un MSS fin est un modèle à petite échelle avec un petit nombre de masses et de ressorts. Nous rappelons aussi que la topologie d'un MSS représente le graphe non orienté dont les nœuds sont les masses et les arêtes les ressorts. Le MSS développé pour *DS/DM* a une topologie en carré, représentée dans la figure 7.1 qui permet de contrôler individuellement les paramètres de raideur et de longueur au repos des huit ressorts du modèle de contrôle et du modèle fantôme, ainsi que le paramètre de viscosité. Nous proposons au lecteur de se reporter à la section 5.5 pour obtenir plus de détails sur l'ensemble des paramètres de contrôle, la topologie, la texture et les stratégies de contrôle gestuel du MSS développé pour *DS/DM*.

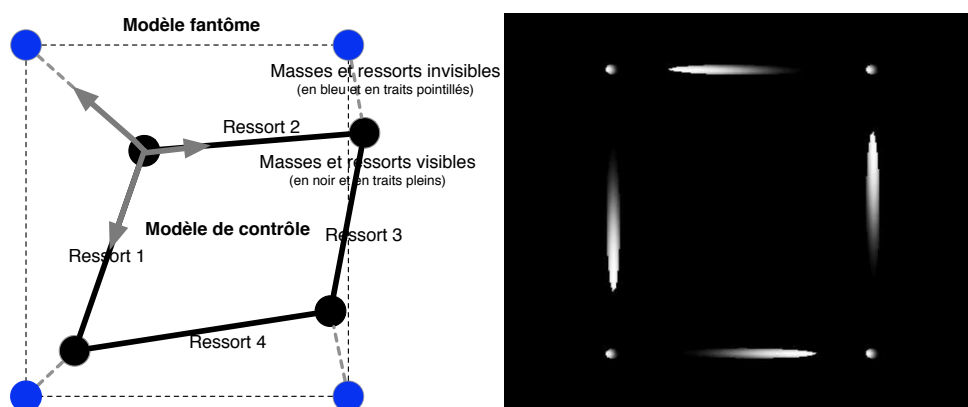


FIGURE 7.1 – La topologie du MSS en deux couches et le texturage du modèle de contrôle (le seul visible par l'utilisateur).

### 7.2.2 Génération des comportements

Nous partons des pré-sets développés dans *DS/DM* pour le contrôle du MSS. Nous proposons au lecteur de se reporter à la section 3.5 pour plus de détails concernant les qualités de mouvement de *DS/DM* et à la section 5.6.1 pour plus de détails concernant le paramétrage du MSS en question. Les pré-sets développés pour *DS/DM* résultent de choix empiriques que nous avons faits en collaboration avec Bertha Bermudez, chercheuse et dan-

seuse de la compagnie EG | PC et coauteur de notre article (Fdili Alaoui *et al.*, 2013). Ensemble, nous avons élaboré un ensemble de pré-sets pour chaque qualité de *DS/DM*. Ces pré-sets définissent des intervalles de raideur des quatre ressorts du modèle de contrôle, des intervalles de longueur au repos des quatre ressorts du modèle de contrôle, et des intervalles de viscosité.

- Les pré-sets du MSS pour le *breathing* sont :
  - La raideur des deux ressorts horizontaux est nulle et leur longueur au repos est fixée à  $L_0$ . Nous appliquons ces deux valeurs afin d’immobiliser le modèle sur l’axe horizontal.
  - La raideur des deux ressorts verticaux prend une valeur  $K_0$  faible. Nous appliquons la même valeur de raideur aux deux ressorts verticaux pour obtenir un mouvement symétrique du modèle par rapport à l’axe vertical.
  - La viscosité prend des valeurs élevées et évolue dans l’intervalle  $[\nu_0, \nu_1]$ .
- Pour le *jumping* :
  - La raideur des deux ressorts horizontaux est nulle et leur longueur au repos est fixée à  $L_{2h}$ . Nous appliquons ces deux valeurs afin d’immobiliser le modèle sur l’axe horizontal.
  - La raideur des ressorts verticaux évolue dans l’intervalle  $[K_2, K_3]$ .
  - La longueur au repos des ressorts verticaux est élevée et évolue dans l’intervalle  $[L_{2v}, L_3]$ . Encore une fois, nous appliquons la même valeur de raideur et de longueur au repos aux deux ressorts verticaux pour obtenir un mouvement symétrique du modèle par rapport à l’axe vertical.
  - La viscosité globale est basse et évolue dans l’intervalle  $[\nu_2, \nu_3]$ .
- Pour l’*expanding* :
  - Les raideurs des quatre ressorts du modèle de contrôle prennent des valeurs qui évoluent dans l’intervalle  $[0, K_5]$ .
  - L’intervalle pour les longueurs au repos des quatre ressorts du modèle de contrôle est  $[L_4, L_5]$ . Étant donné que l’*expanding* est un mouvement non symétrique, nous appliquons quatre valeurs différentes de raideur et de longueur au repos aux quatre ressorts du MSS.
  - La viscosité globale et évolue dans l’intervalle  $[0, \nu_5]$ .
- Pour le *reducing* :
  - La raideur des ressorts évolue dans l’intervalle  $[0, K_7]$ .
  - La longueur au repos des ressorts est faible et évolue dans l’intervalle  $[L_6, L_7]$ . Nous donnons la même valeur de raideur et longueur au repos aux quatre ressorts du modèle de contrôle pour obtenir un mouvement symétrique du modèle par rapport à l’axe vertical et à l’axe horizontal.
  - La viscosité globale est élevée et évolue dans l’intervalle  $[0, \nu_7]$ .

En faisant varier les paramètres à l’intérieur, à l’extérieur et au bord des in-



Comportement	Raideur Verticale	Raideur et Elongation Horizontales	Viscosité Globale
C1	$< K_0$	$= (0, L_0)$	$\in [\nu_0, \nu_1]$
C2	$= K_0$	$= (0, L_0)$	$\in [\nu_0, \nu_1]$
C3	$> K_0$	$= (0, L_0)$	$\in [\nu_0, \nu_1]$
C4	$= K_0$	$= (0, L_0)$	$< \nu_0$
C5	$= K_0$	$= (0, L_0)$	$= \nu_0$
C6	$= K_0$	$= (0, L_0)$	$= \nu_1$
C7	$= K_0$	$= (0, L_0)$	$> \nu_1$
C8	$= K_0$	$\neq (0, L_0)$	$\in [\nu_0, \nu_1]$

TABLE 7.1 – Les 8 paramétrages des comportements de type B

Comportement	Raideur Verticale	Elongation Verticale	Raideur et Elongation Horizontales	Viscosité Globale
C9	$\in [K_2, K_3]$	$< L_{2v}$	$= (0, L_{2h})$	$> \nu_3$
C10	$\in [K_2, K_3]$	$= L_{2v}$	$= (0, L_{2h})$	$= \nu_3$
C11	$\in [K_2, K_3]$	$\in [L_{2v}, L_3]$	$= (0, L_{2h})$	$\in [\nu_2, \nu_3]$
C12	$\in [K_2, K_3]$	$= L_3$	$= (0, L_{2h})$	$= \nu_2$
C13	$\in [K_2, K_3]$	$> L_3$	$= (0, L_{2h})$	$< \nu_2$
C14	$< K_2$	$\in [L_{2v}, L_3]$	$= (0, L_{2h})$	$\in [\nu_2, \nu_3]$
C15	$= K_2$	$\in [L_{2v}, L_3]$	$= (0, L_{2h})$	$\in [\nu_2, \nu_3]$
C16	$= K_3$	$\in [L_{2v}, L_3]$	$= (0, L_{2h})$	$\in [\nu_2, \nu_3]$
C17	$> K_3$	$\in [L_{2v}, L_3]$	$= (0, L_{2h})$	$\in [\nu_2, \nu_3]$
C18	$\in [K_2, K_3]$	$\in [L_{2v}, L_3]$	$\neq (0, L_{2h})$	$\in [\nu_2, \nu_3]$

TABLE 7.2 – Les 10 paramétrages des comportements de type J

tervalles décrits ci-dessus, nous constituons quatre ensembles de comportements de type *breathing* (respectivement *jumping*, *expanding* et *reducing*) dont les pré-sets sont détaillés dans le tableau 7.1 (respectivement 7.2, 7.3, 7.4)

1. Les comportements de type *breathing* seront notés dans la suite du chapitre C1 ... à C8, sont qualifiés de type B.
2. Les comportements de type *jumping*, notés de C9 ... à C18, sont qualifiés de type J.
3. Les comportements de type *expanding*, notés de C19 ... à C27, sont

Comportement	Raideur Globale	Elongation Globale	Viscosité Globale
C19	$< 0$	$\in [L_4, L_5]$	$> \nu_5$
C20	$= 0$	$\in [L_4, L_5]$	$= \nu_5$
C21	$\in [0, K_5]$	$\in [L_4, L_5]$	$\in [0, \nu_5]$
C22	$= K_5$	$\in [L_4, L_5]$	$= 0$
C23	$> K_5$	$\in [L_4, L_5]$	$< 0$
C24	$\in [0, K_5]$	$< L_4$	$\in [0, \nu_5]$
C25	$\in [0, K_5]$	$= L_4$	$\in [0, \nu_5]$
C26	$\in [0, K_5]$	$= L_5$	$\in [0, \nu_5]$
C27	$\in [0, K_5]$	$> L_5$	$\in [0, \nu_5]$

TABLE 7.3 – Les 9 paramétrages des comportements de type E

Comportement	Raideur Globale	Elongation Globale	Viscosité Globale
C28	$> K_7$	$\in [L_6, L_7]$	$> \nu_7$
C29	$= K_7$	$\in [L_6, L_7]$	$= \nu_7$
C30	$\in [0, K_7]$	$\in [L_6, L_7]$	$\in [0, \nu_7]$
C31	$= 0$	$\in [L_6, L_7]$	$= 0$
C32	$< 0$	$\in [L_6, L_7]$	$< 0$
C33	$\in [0, K_7]$	$< L_6$	$\in [0, \nu_7]$
C34	$\in [0, K_7]$	$= L_6$	$\in [0, \nu_7]$
C35	$\in [0, K_7]$	$= L_7$	$\in [0, \nu_7]$
C36	$\in [0, K_7]$	$> L_7$	$\in [0, \nu_7]$

TABLE 7.4 – Les 9 paramétrages des comportements de type R

qualifiés de type E.

4. Les comportements de type *reducing*, notés dans ce qui suit C28 ... à C36, sont qualifiés de type R.

Afin de générer les comportements de types E et J, nous prenons en compte la corrélation entre les paramètres de viscosité et de raideur des ressorts, car ils sont associés à la quantité de mouvement du participant dans l'installation *DS/DM*. Le paramètre de quantité de mouvement est détaillé dans la section 4.4.2. Nous avons donc préservé cette corrélation lors de la génération des comportements de type E et J.

### 7.3 Participants

Nous avons recruté 26 participants (14 femmes, 12 hommes, âgés de 10 à 40 ans) pour cette étude. Nous avons demandé aux participants d'évaluer leur connaissance de l'atelier Double Skin/Double Mind. 10 personnes sur 16 ont considéré qu'ils avaient des connaissances de *DS/DM*.

### 7.4 Conception expérimentale

Nous décrivons dans cette section la conception expérimentale de notre évaluation en ligne. Rappelons que cette évaluation a pour but d'étudier l'influence du paramétrage du MSS sur la génération de comportements perceptivement similaires aux qualités de mouvement de *DS/DM*.

#### 7.4.1 Evaluation en ligne

Nous conduisons une évaluation en ligne avec une tâche de classification des comportements visuels générés en qualités de mouvement de *DS/DM*. Nous avons choisi d'utiliser une évaluation en ligne contrôlée car notre objectif était de permettre à des danseurs ayant suivi l'atelier *DS/DM* avec Emio Greco et qui habitent dans différents pays de participer à l'expérience.

Finalement, seulement 10 participants sur 26 qui ont répondu à notre appel, étaient des danseurs ayant une connaissance pratique de *DS/DM*. Cela ne nous a pas permis d'avoir assez de données pour comparer les résultats de l'évaluation en fonction de l'expertise du participant. Néanmoins, les données recueillies pour un total de 26 participants ayant passé cette expérience en ligne, étaient suffisants pour conduire une analyse quantitative des résultats de l'expérience.

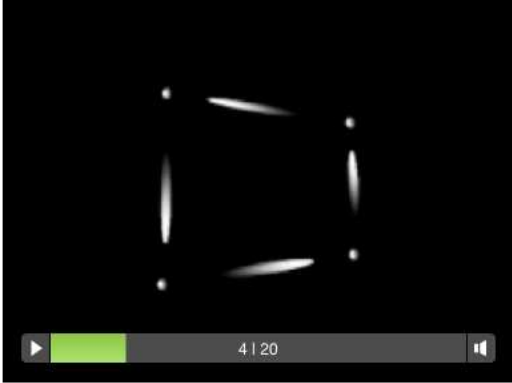
#### 7.4.2 Procédure expérimentale

Nous avons élaboré une évaluation inter-participants car chaque participant classe un ensemble différent de comportements. Précisément, chaque participant évalue 10 comportements de MSS, sélectionnés de façon aléatoire, parmi les 35 existants. De plus, l'ordre des comportements évalués est aléatoire pour chaque participant.

Lorsque le participant commence l'expérience, il est face à une première page composée de quatre extraits vidéo d'Emio Greco où il exécute et explique par ses propres mots les qualités de mouvement de *DS/DM* : *breathing*, *jumping*, *expanding* et *reducing*. La consigne à ce stade de l'expérimentation est de regarder attentivement ces vidéos avant de commencer

l'évaluation des comportements.

Par la suite, le participant est amené à visualiser des extraits vidéos des comportements du MSS et à les évaluer au travers d'un questionnaire. Pour chaque comportement, la consigne est de visualiser l'extrait vidéo autant de fois que le participant le désire avant de répondre questionnaire. Chaque comportement est présenté dans un extrait vidéo de 20 secondes. La figure 7.2 représente une capture d'écran de l'une des pages en ligne correspondant à une des 10 étapes de l'évaluation pour un comportement donné.



**Question : Do you think the visuals in the video represent Double Skin Double Mind component ?**

Please answer the question for each line bellow (Breathing, Jumping, Expanding, Reducing and Other).

	not at all	slightly	moderately	considerably	very strongly
Breathing	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Jumping	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Expanding	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Reducing	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Other	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

[Next](#)

FIGURE 7.2 – Capture d'écran représentant une page du questionnaire en ligne

### 7.4.3 Questionnaire

La figure 7.2 illustre la question posée, pour chaque comportement, au participant : « Pensez vous que les visuels dans la vidéo représentent le composant Double Skin/ Double Mind ? »

- *breathing*
- *jumping*
- *expanding*
- *reducing*
- *autre*

Le participant doit classer le comportement suivant chacune des qualités de mouvement de *DS/DM* sur une échelle linéaire de 1 à 5, où 5 correspond à « fortement d'accord » et 1 à « fortement en désaccord ». La consigne donnée au participant précise qu'il doit répondre à la question pour chaque élément du questionnaire. L'élément *autre* est ajouté dans le questionnaire au cas où le participant ne classe les comportements du MSS dans aucune qualité de *DS/DM*.

Dans le questionnaire, nous avertissons le participant qu'il n'y a pas de réponse correcte et qu'il lui est demandé de répondre à la question en fonction de ce qu'il croit être le plus approprié.

### 7.4.4 Contrôle de l'expérience en ligne

Nous avons élaboré une série de contrôles pour l'évaluation en ligne :

1. Le participant n'est pas en mesure de commencer l'évaluation sans avoir visualisé l'ensemble des vidéos où Emio Greco explique et exécute tous les composants de *DS/DM*.
2. A chaque étape de l'évaluation, il n'est pas possible de revenir en arrière.
3. A chaque étape de l'évaluation, il n'est pas possible de répondre au questionnaire sans avoir commencé à visualiser la séquence vidéo du comportement.
4. Il n'est pas possible de passer à l'étape suivante sans avoir répondu à la question posée pour chaque élément du questionnaire et donc pour chaque qualité de *DS/DM* en plus de l'élément *autre*.
5. Pour chaque ligne du questionnaire, il n'est possible de cocher qu'une seule case parmi les 5 de l'échelle linéaire allant de « fortement en désaccord » à « fortement d'accord ».

## 7.5 Analyse des données

Dans une première étape, nous analysons l'influence du facteur du type de comportement sur sa classification en qualités de *DS/DM*. Pour ce faire,

nous effectuons une analyse de variance (ANOVA) à un facteur (le type de comportements) et 4 modalités (le type *breathing* (B), *jumping* (J), *expanding* (E) et *reducing* (R)) sur les scores relatifs aux 5 éléments (les 4 qualités de *DS/DM* + l'élément *autre*). Par la suite nous effectuons une analyse post-hoc qui permet de comparer les facteurs de types de comportements deux à deux en termes de qualités de mouvement perçues. De plus, nous obtenons pour chaque type de comportement, la moyenne et l'écart type des scores de classification suivant chaque élément.

Dans une deuxième étape, nous approfondissons l'analyse en accentuant le niveau de détail et en examinant l'influence des pré-sets relatifs à chaque type de comportement sur les scores de classification. Nous effectuons une analyse de variance (ANOVA) à un facteur (le pré-set) sur les scores de classification en qualités de *DS/DM* pour les comportements d'un même type. Par la suite, nous effectuons un test post-hoc qui permet de comparer les comportements issus du même type deux à deux, en fonction de la perception des qualités de *DS/DM*. De plus, nous obtenons pour chaque pré-set correspondant à un comportement donné, la moyenne et l'écart type des scores de classification suivant chaque élément.

## 7.6 Résultats

Nous avons recueilli  $26 \times 10 \times 5$  scores correspondant aux évaluations des 26 participants de 10 comportements par rapport aux 5 éléments (4 qualités de *DS/DM* plus un élément *autre*).

### 7.6.1 Influence du type de comportement sur la perception des qualités de mouvement

#### a) Influence du type de comportement sur la perception du *breathing*

Les résultats de l'analyse de la variance (ANOVA) sur les scores donnés par les participants montrent que le facteur de type de comportement a une influence significative sur les scores de la classification en *breathing* ( $F(3,249) = 38.2, p < 0.05$ ).

L'analyse post-hoc montre que les comportements de type B ont été significativement davantage classés en *breathing* que tous les autres types de comportements (figure 7.3). Ceci révèle que les participants ont globalement davantage perçu des qualités de *breathing* dans les comportements que nous avons générés à partir des pré-sets du MSS issus de *DS/DM* (pré-sets de type B conçus pour représenter la qualité de mouvement de *breathing* dans l'installation).

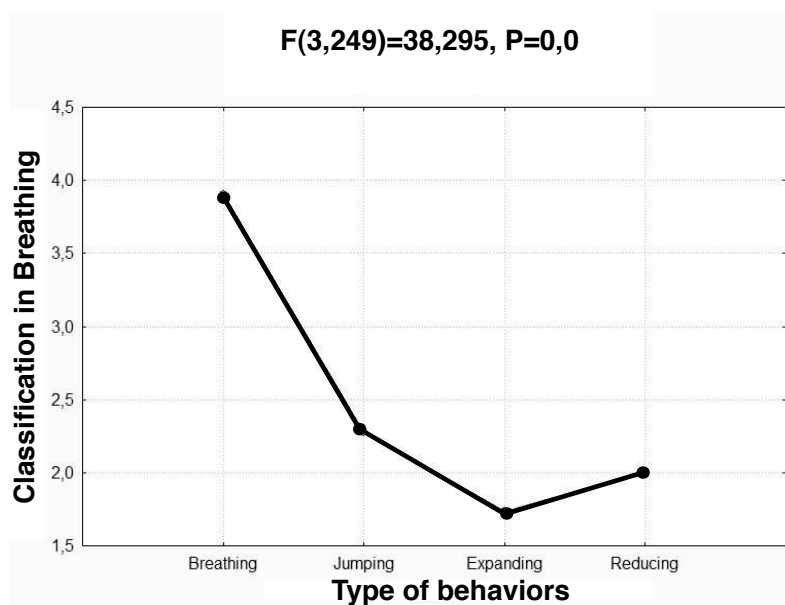


FIGURE 7.3 – Résultats de l'analyse de variance sur les scores relatifs au *breathing*, pour l'ensemble des comportements regroupés par type

**b) Influence du type de comportement sur la perception du *jumping***

Pour ce qui est de la classification en *jumping*, les résultats de l'ANOVA ayant comme facteur le type de comportement, montrent que le facteur de type a une influence significative sur les scores de la classification ( $F(3,249) = 22.5, p < 0.05$ ).

L'analyse post-hoc révèle que les scores de classification en *jumping* des comportements de type J sont significativement plus élevés que ceux des autres types de comportement (figure 7.4). Comme pour le *breathing*, ceci révèle que les participants ont globalement davantage perçus des qualités de *jumping* dans les comportements que nous avons générés, à partir des pré-sets du MSS issus de *DS/DM* et conçus pour représenter cette même qualité.

**c) Influence du type de comportement sur la perception du *expanding***

Les résultats de l'ANOVA sur les scores de classification en qualité d'*expanding* montrent que le facteur de type de comportement a une influence significative sur les scores de cette classification ( $F(3,249) = 2.9, p < 0.05$ ).

Les résultats de l'analyse post-hoc montrent que cette différence significative existe uniquement entre les comportements de type R et ceux de type E ou B : les comportements de type E ou B sont significativement plus classés comme de l'*expanding*, que ceux de type R (figure 7.5). En revanche, les participants ont indifféremment classé comme des qualités de mouvement

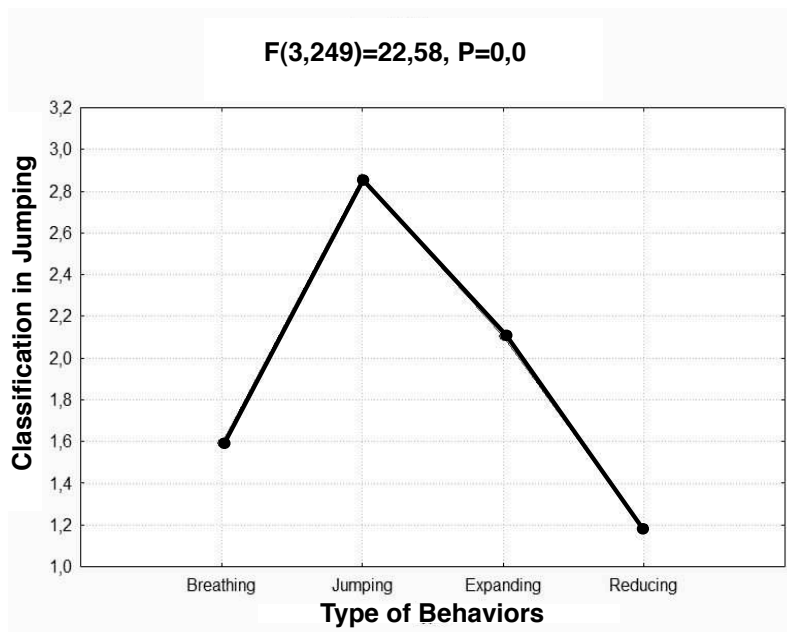


FIGURE 7.4 – Résultats de l'analyse de variance sur les scores relatifs au *jumping*, pour l'ensemble des comportements regroupés par type

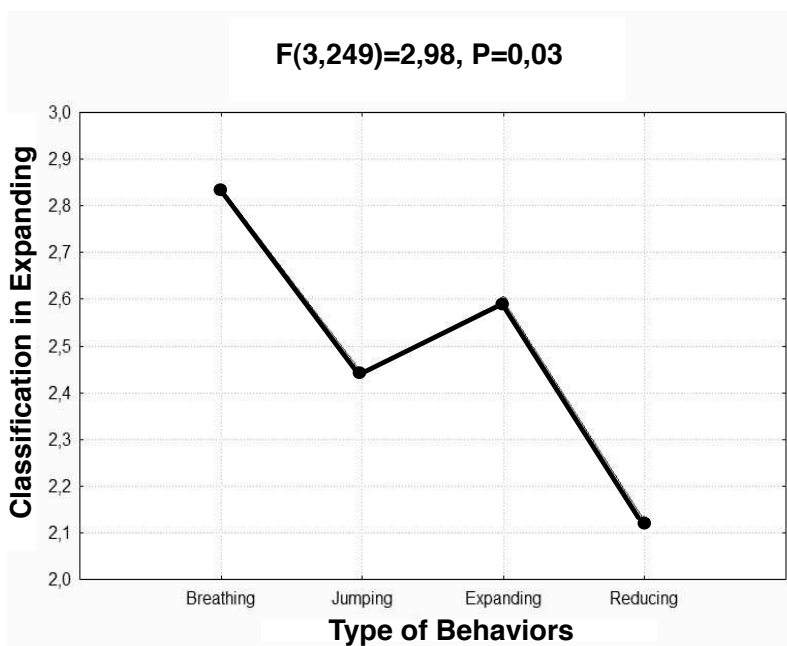


FIGURE 7.5 – Résultats de l'analyse de variance sur les scores relatifs à l'*expanding*, pour l'ensemble des comportements regroupés par type



d'*expanding* les comportements de type B, J ou E.

Aussi, l'uniformité de la classification en *expanding* des comportements de type B et des comportement de type E indique une certaine confusion entre les deux qualités de mouvement, *expanding* et *breathing*. Cela n'est pas étonnant car cette confusion existait même lors du workshop *DS/DM* donné par Emio Greco. Cette confusion a d'ailleurs été soulevée par les étudiants en danse qui ont participé à l'expérience conduite sur *DS/DM*, que nous décrivons dans le chapitre 8.

d) Influence du type de comportement sur la perception du *reducing*

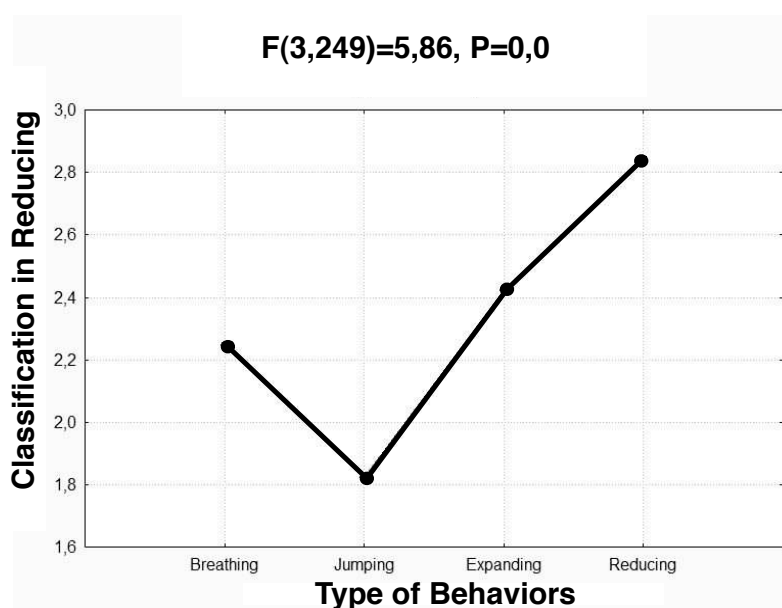


FIGURE 7.6 – Résultats de l'analyse de variance sur les scores relatifs au *reducing*, pour l'ensemble des comportements regroupés par type

Les résultats de l'ANOVA sur les scores de la classification en qualité de *reducing* montrent que le facteur de type de comportement a une influence significative sur les scores de cette classification ( $F(3,249)=5.8$ ,  $p<0.05$ ).

L'analyse post-hoc montre que les comportements de type R sont significativement plus classés comme un *reducing* que les comportements de type J ou de type B (figure 7.6). Cependant, en comparant les résultats pour les types R et E, il semble que leurs comportements sont uniformément classés en *reducing* ( $p=0,11>0.05$ ) (figure 7.6). Pour analyser cela plus en profondeur, nous examinerons dans la deuxième phase d'analyse détaillée section 7.6.2, la classification de chaque comportement de type E et de type R pris individuellement en composants de *DS/DM* et particulièrement en *reducing*.

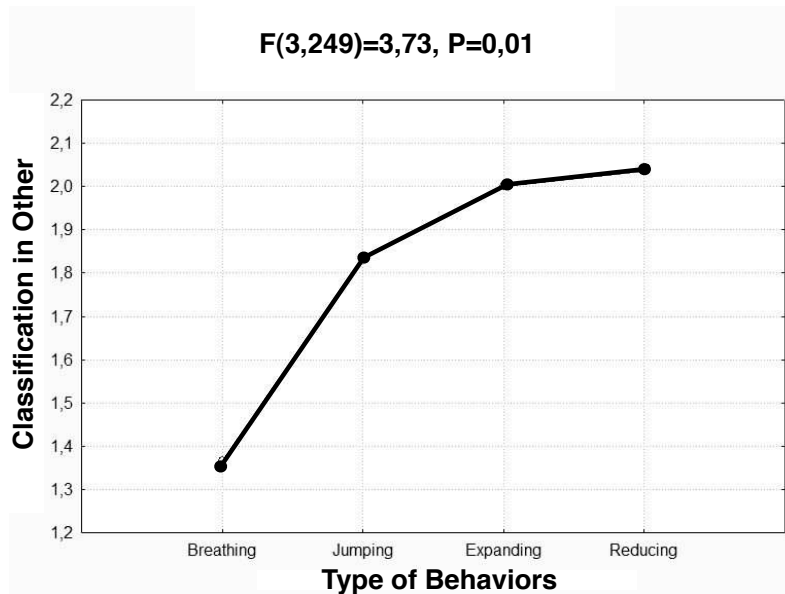
e) Influence du type de comportement sur la perception de *autre*

FIGURE 7.7 – Résultats de l'analyse de variance sur les scores relatifs à la réponse *autre*, pour l'ensemble des comportements regroupés par type

Les résultats de l'ANOVA sur les scores de classification en *autre* avec comme facteur le type de comportement montre que le facteur de type de comportement a une influence significative sur les scores de cette classification ( $F(3,247) = 3.7, p < 0.05$ ).

L'analyse post-hoc révèle qu'en moyenne les participants classifient significativement moins les comportements de type B comme *autre*, que tous les autres types de comportement (figure 7.7). Cependant, les moyennes des résultats de classification en *autre* sont généralement basses car dans la majorité des cas, les participants ont pu associer des qualités de mouvement de *DS/DM* aux simulations représentées dans les vidéos sauf dans certains cas particuliers tels que celui où les visuels sont immobiles. Ceci fera l'objet de la deuxième phase d'analyse, détaillée ci-dessous.

### 7.6.2 Influence du pré-set sur la perception des QM

#### a) Influence des pré-sets de type *breathing* sur la perception des qualités de *DS/DM*

Les résultats de l'analyse de variance sur les scores de classification en qualité de *breathing* des comportements de type B, montrent que le facteur de pré-set a une influence significative sur la classification ( $F(7, 52) = 2.2, p < 0.05$ ). Cependant, sur les scores de classification en *jumping*, *expanding*

Comportement	Moyenne (Ec-typ) <i>breathing</i>	Moyenne (Ec-typ) <i>jumping</i>	Moyenne (Ec-typ) <i>expanding</i>	Moyenne (Ec-typ) <i>reducing</i>	Moyenne (Ec-typ) <i>autre</i>	N
C1	4,0(1,3)	1,7(1,3)	2,6(1,8)	2,4(1,5)	1,7(0,8)	9
C2	4,6(0,5)	1,6(1,1)	2,3(0,5)	1,6(0,5)	1,0(0,0)	3
C3	3,7(1,1)	1,7(0,7)	2,8(1,4)	2,6(1,7)	1,2(0,6)	12
C4	3,8(1,3)	1,2(0,4)	3,4(0,8)	2,0(1,7)	1,0 (0,0)	5
C5	4,5(0,7)	1,6(1,1)	3,1(1,3)	2,7(1,7)	1,2(0,6)	9
C6	3,6(1,7)	1,7(0,6)	2,6(1,4)	1,9(1,3)	1,4(0,8)	11
C7	4,5(0,7)	1,3(0,4)	3,3(1,4)	2,3(1,6)	1,3(0,7)	6
C8	2,2(1,0)	1,2(0,4)	2,6(1,1)	1,4(0,8)	1,8(1,7)	5

TABLE 7.5 – Résultats de la classification des comportements de type B en qualités de mouvement de *DS/DM*.

*reducing*, ou en *autre*, le facteur de pré-set ne semble pas avoir d'influence. Autrement dit, les participants ne différencient pas les différents pré-sets de type B quand il s'agit de les classer en *jumping*, *expanding*, *reducing* ou *autre*.

Les résultats de l'analyse post-hoc montrent que la différence significative de classification en qualité de *breathing* est spécifique au comportement C8. Effectivement, le comportement C8 semble être significativement moins perçu comme un *breathing* que les autres comportements. Rappelons que ce comportement propose une extension du modèle dans d'autres directions que la verticalité. Donc, ce résultat indique que les participants considèrent (tout comme Emio Greco lui-même) que la représentation du *breathing* doit impliquer un mouvement du modèle exclusivement vertical.

Comme le précise le tableau 7.5, les comportements C1 à C7 sont tous autant perçus comme des *breathing*, avec des moyennes assez homogènes et élevées. Cela indique que le paramétrage requis pour représenter un *breathing* peut tolérer des intervalles plus souples que ceux que nous avons définis dans *DS/DM* car une viscosité et une raideur plus ou moins élevées des ressorts n'affecteraient pas la perception de la qualité de *breathing* dans les comportements du MSS.

#### b) Influence des pré-sets de type *jumping* sur la perception des qualités de *DS/DM*

Les résultats de l'analyse de variance sur les scores de classification des comportements de type J en qualité de mouvement de *jumping* (respectivement de *breathing* et d'*expanding*) montrent que le facteur de pré-set a une

Comportement	Moyenne (Ec-typ) <i>breathing</i>	Moyenne (Ec-typ) <i>jumping</i>	Moyenne (Ec-typ) <i>expanding</i>	Moyenne (Ec-typ) <i>reducing</i>	Moyenne (Ec-typ) <i>autre</i>	N
C9	1,1(0,3)	1,5(0,7)	1,4(0,7)	1,75(1,4)	2,6(1,4)	9
C10	1,6(1,3)	2,7(1,3)	2,3(1,1)	1,4(1,1)	2,1(1,6)	9
C11	1,6(1,2)	4,5(0,8)	1,8(1,1)	1,4(1,6)	2,0(1,2)	6
C12	2,5(0,5)	4,5(0,5)	2,0(1,4)	1,7(0,9)	1,5(1,0)	4
C13	1,6(1,0)	4,3(0,8)	2,2(1,4)	2,1(1,4)	1,5(0,8)	9
C14	3,1(1,0)	1,1(0,2)	3,4(0,5)	2,3(1,3)	1,4(0,9)	12
C15	3,3(0,9)	1,4(0,7)	3,2(1,1)	1,6(0,6)	1,5(0,7)	12
C16	1,7(0,9)	3,7(1,2)	2,5(1,2)	2,5(1,0)	2,5(1,2)	4
C17	2,3(1,3)	4,0(1,2)	2,3(1,3)	1,5(1,6)	1,8(1,3)	6
C18	2,6(1,1)	4,2(1,4)	2,0(1,1)	1,6(1,1)	1,8(1,2)	8

TABLE 7.6 – Résultats de la classification des comportements de type J en qualités de DS/DM.

influence significative sur la classification ( $F(9,69)=17.4$ ,  $p<0.05$ ) (respectivement ( $F(9,69)=4.7$ ,  $p<0.05$ ) et ( $F(9,69)=3,0428$ ,  $p=,00402$ )). Cependant, sur les scores de classification en *reducing*, ou en *autre*, le facteur de pré-set ne semble pas avoir d'influence.

Concernant la classification en *jumping*, les résultats du test post-hoc reportés dans la troisième colonne du tableau 7.6 montrent qu'il n'y a pas de différences significatives entre les comportements C11, C12, C13, C16, C17 et C18. Autrement dit, ces comportements sont tous perçus avec des moyennes élevées et homogènes, comme des *jumping*. Cette ambiguïté révèle que générer une oscillation plus ample et énergique au travers d'une viscosité plus basse, de longueurs au repos plus élevées, ou d'oscillations dans différentes directions (et non uniquement verticales) n'altère pas la perception du *jumping* dans les comportements du MSS.

Par ailleurs, ce même test post-hoc montre que chacun des comportements C9, C10, C14 et C15 est significativement moins classé comme un *jumping* que chacun des comportement C11, C12, C13, C16, C17 et C18 ( $F(9,69)=17.4$ ,  $p<0.05$ ). Cela peut s'expliquer par :

- La raideur faible des ressorts verticaux dans C14 et C15 induit un modèle qui s'étend lentement plutôt qu'un modèle qui oscille. Ceci est cohérent avec les résultats du test post-hoc sur les scores de classement en *expanding* (respectivement sur le classement en *breathing*), qui montre que les comportements C14 et C15 sont significativement plus classés comme *expanding* (respectivement comme *breathing*) que les comportements C9, C11, C12, C13 et C18. Autrement dit, C14 et C15 ont des oscillations

Comportement	Moyenne (Ec-typ) <i>breathing</i>	Moyenne (Ec-typ) <i>jumping</i>	Moyenne (Ec-typ) <i>expanding</i>	Moyenne (Ec-typ) <i>reducing</i>	Moyenne (Ec-typ) <i>autre</i>	N
C19	1,8(0,9)	1,1(0,4)	3,1(1,3)	1,6(1,0)	2,3(1,5)	6
C20	1,2(0,4)	1,4(0,5)	1,2(0,4)	1,6(0,5)	2,8(1,7)	5
C21	2,6(1,5)	1,3(0,5)	3,6(0,5)	2,6(1,5)	3,0(2,0)	3
C22	1,5(0,5)	1,8(1,3)	2,8(0,9)	2,3(1,3)	1,6(1,0)	6
C23	2,1(1,4)	2,4(1,5)	3,8(0,3)	1,6(1,0)	1,8(1,3)	9
C24	1,7(1,0)	2,8(1,7)	1,7(1,0)	3,8(1,3)	1,4(0,9)	10
C25	1,2(0,5)	1,2(0,5)	1,0(0,0)	3,7(1,8)	1,0(0,0)	4
C26	2,0(1,3)	2,7(1,7)	3,3(1,1)	2,0(1,5)	2,4(1,5)	9
C27	1,2(0,4)	2,2(1,7)	1,8(1,3)	2,4(1,3)	2,0(1,4)	5

TABLE 7.7 – Résultats de la classification des comportements de type E en qualités de *DS/DM*.

lentes et progressives assimilées à du *breathing* ou du *expanding* plutôt qu'à du *jumping*.

- Dans le cas de C9, sa grande viscosité induit un modèle qui s'étend lentement plutôt qu'un modèle qui oscille.
- Dans le cas de C10, ses longueurs au repos très basses induisent un modèle pas assez ample et un mouvement très lent, presque immobile, qui, de ce fait, n'est pas classé comme un *jumping*.

### c) Influence des pré-sets de type *expanding* sur la perception des qualités de *DS/DM*

Les résultats de l'analyse de variance sur les scores de classification des comportements de type E en qualité de mouvement d'*expanding* (respectivement de *reducing*) montrent que le facteur de pré-set a une influence significative sur la classification ( $F(8,48)=7.9, p<0.05$ ) (respectivement ( $F(8,048)=2.8, p<0.05$ )). Cependant, sur les scores de classification en *breathing*, *jumping*, ou en *autre*, le facteur de pré-set ne semble pas avoir d'influence.

Les résultats du test post-hoc reportés dans le tableau 7.7 montrent que les comportements C19, C21, C23, C26 ne sont pas différenciés par les participants lors de la classification en *expanding*. Ces comportements sont perçus comme des *expanding* avec des moyennes élevées et homogènes (pas de différences significatives entre les moyennes de ces comportements). Les comportements C21 et C26 correspondent aux pré-sets développés dans *DS/DM* et C19 et C23 proposent, d'une part, une raideur négative et une

viscosité élevée et, d'autre part, une raideur importante et une viscosité négative, ce qui implique dans les deux cas un mouvement du MSS plus ample et rapide. Cette ambiguïté indique que le paramétrage requis pour représenter un *expanding* peut tolérer une forte amplitude et énergie dans le mouvement de masses, à travers des longueurs au repos et des raideurs plus élevées ou une viscosité plus basse.

Les résultats du test post-hoc montrent aussi que chacun des comportements C24, C25 et C27 est significativement moins perçu comme un *expanding* que les autres comportements de type E. Dans le cas de C24 et C25, ce résultat est dû aux longueurs au repos nulles ou négatives qui impliquent une réduction lente des masses vers le centre plutôt que leur extension. Ce résultat est cohérent avec d'autres résultats de l'analyse post-hoc qui montrent que ces deux comportements sont significativement davantage classés en *reducing* que les autres comportements de type E. Enfin, la perception significativement moins élevée du *expanding* pour le comportement C27 par rapport aux autres comportements issus du même type peut être expliquée par les longueurs au repos trop élevées qui, en induisant une extension trop élastique, peuvent faire diverger les masses.

**d) Influence des pré-sets de type *reducing* sur la perception des qualités de DS/DM**

Comportement	Moyenne (Ec-typ) <i>breathing</i>	Moyenne (Ec-typ) <i>jumping</i>	Moyenne (Ec-typ) <i>expanding</i>	Moyenne (Ec-typ) <i>reducing</i>	Moyenne (Ec-typ) <i>autre</i>	N
C28	1,5(0,5)	1,0(0,0)	1,3(1,0)	3,5(0,9)	2,2(1,3)	8
C29	2,3(1,5)	1,1(0,4)	2,0(1,5)	4,1(0,7)	1,8(1,3)	6
C30	2,1(1,3)	1,1(0,3)	1,8(1,2)	4,5(0,7)	1,6(1,1)	8
C31	1,0(0,0)	1,0(0,0)	1,0(0,0)	1,0(0,0)	3,0(2,0)	7
C32	2,8(1,4)	1,2(0,4)	3,5(1,0)	1,6(1,1)	1,6(1,1)	8
C33	2,1(1,5)	1,4(1,0)	2,0(1,3)	2,7(1,2)	2,4(1,7)	9
C34	2,3(1,1)	1,3(1,0)	1,6(1,3)	3,6(1,2)	1,0(0,0)	3
C35	1,5(0,7)	1,5(0,7)	2,5(2,1)	3,0(1,4)	2,0(1,4)	2
C36	2,0(0,7)	1,0(0,0)	3,6(0,8)	1,6(0,8)	1,8 (1,3)	5

TABLE 7.8 – Résultats de la classification des comportements de type R en qualités de mouvement de DS/DM.

Les résultats de l'analyse de variance sur les scores de classification des comportements de type R en qualités de mouvement de *reducing* (respectivement de *expanding*) montrent que le facteur de pré-set a une influence

significative sur la classification ( $F(8.47)=11,9$ ,  $p<0.05$ ) (respectivement ( $F(8.47)=3.9$ ,  $p<0.05$ ). Cependant, sur les scores de classification en *breathing*, *jumping*, ou en *autre*, le facteur de pré-set ne semble pas avoir d'influence.

Les résultats de l'analyse post-hoc montrent que les comportements C28, C29, C30, C34 ne sont pas significativement différenciés par les participants lors de la classification en *reducing*. Leurs scores ne se distinguent pas mais restent homogènes et élevés. ce résultat indique que le paramétrage requis pour représenter un *reducing* peut tolérer des intervalles de longueur au repos, de raideur et de viscosité plus larges.

Les comportements C31, C32, C36 sont significativement moins perçus comme des *reducing* que le reste des comportements de ce même type. Dans le cas de C32, cela est dû à une viscosité négative. Dans le cas de C34, ce résultat est dû à des longueurs au repos trop élevées. Dans les deux cas, le mouvement résultant du modèle s'étend plutôt que ne se réduit. Ceci est cohérent avec les résultats du test post-hoc de classification en *expanding* qui montrent que ces deux comportements sont significativement plus classés en *expanding* que les autres comportements de type R. Enfin, dans le cas de C31, le résultat de l'analyse post-hoc est dû aux raideurs nulles qui immobilisent les masses. C31 est significativement plus classé en *autre* que le reste des comportements de type R. Ceci indique qu'un comportement avec des masses « immobiles » n'est pas considéré par les participants comme représentant une qualité de mouvement de *DS/DM*.

## 7.7 Synthèse et discussion

L'expérience décrite dans ce chapitre souligne que les pré-sets définis pour le contrôle de MSS dans *DS/DM*, génèrent des comportements perceptivement similaires aux qualités de mouvement de *DS/DM*. Et cela à l'exception des pré-sets de type E, conçus pour rendre une qualité d'*expanding*, qui sont globalement plus assimilés à du *breathing*, et cela à cause d'une certaine confusion entre ces deux composants. Cette confusion a été soulevée dans les expériences présentées dans le chapitre 8. Effectivement, les étudiants en danse considèrent que l'*expanding* est la qualité de *DS/DM* la plus difficile à distinguer et à maîtriser intellectuellement et corporellement. Ceci s'explique par les similarités entre le *breathing* et l'*expanding* qui reposent sur des extensions (l'une verticale, l'autre dans l'espace 3D) et s'appuient sur l'inspiration et l'expiration pour rythmer le mouvement.

L'expérience décrite dans ce chapitre a d'abord permis de valider la légitimité du choix de l'utilisation d'un modèle « léger » de type masses-ressorts pour créer un retour visuel réflexif dans le contexte de la pédagogie de la danse et de *DS/DM* en particulier.

En plus de valider les capacités des MSS à représenter les composants de *DS/DM*, cette expérience a évalué le paramétrage de ces MSS. Elle a montré qu'en plus des pré-sets développés pour *DS/DM*, certains pré-sets en dehors des intervalles définis génèrent des comportements qui sont tout de même perçus comme les qualités de *DS/DM* par les participants. Cela indique qu'il est possible d'assouplir les paramètres du contrôle gestuel dans *DS/DM* sans affecter la perception de la réponse visuelle. L'évaluation a permis de déterminer les conditions suivantes, requises lors du paramétrage du MSS afin d'obtenir des comportements perçus comme « similaires » à ceux des utilisateurs qui exécutent les qualités de *DS/DM* :

- La représentation du *breathing* nécessite des extensions et réductions exclusivement verticales et lentes. Nous obtenons cela grâce à des raideurs horizontales nulles, une viscosité importante et des raideurs verticales faibles.
- La représentation du *jumping* nécessite des oscillations verticales (mais aussi éventuellement horizontales), rapides et amples. Nous pouvons obtenir cela grâce à une viscosité faible et des raideurs et longueurs au repos verticales fortes.
- La représentation de *expanding* nécessite une extension ample et énergique qui se déploie dans toutes les directions. Nous obtenons cela grâce à une viscosité faible et des raideurs et des longueurs au repos fortes et différentes pour chaque ressort du modèle. Les longueurs au repos doivent cependant être contrôlées afin de veiller à ce que les masses ne divergent pas.
- La représentation du *reducing* nécessite une réduction du modèle sous forme d'un rapprochement lent des masses vers le centre. Nous obtenons cela grâce à une viscosité forte et des longueurs au repos nulles.

Les conditions sur les pré-sets du MSS qui ressortent de notre évaluation sont moins restrictives que celles que nous avons adoptées pour *DS/DM*. Cela indique qu'un concepteur de MSS qui s'intéresse à la visualisation de comportement similaires aux qualités de mouvement peut éventuellement disposer d'intervalles de variation des paramètres assez grands en valeur relative. En d'autres termes, pour la représentation de qualités de mouvement par des comportements dynamiques, une erreur relative sur la définition des valeurs optimales du MSS est autorisée.





## Chapitre 8

# Evaluations de *DS/DM*

### 8.1 Question de recherche

La question de recherche que nous examinons dans ce chapitre est : dans un contexte de pédagogie de la danse, quel est l'apport d'une interaction basée sur les qualités de mouvement avec des visuels par modèles physiques masses-ressorts (MSS) ?

L'hypothèse générale concernant l'utilisation de tels visuels interactifs dans un contexte pédagogique est qu'ils pourraient correspondre à un dispositif de médiation du processus de régulation de l'apprentissage. Selon l'approche constructive de la connaissance de Piaget (1974), tout processus d'apprentissage implique des processus de régulation relevant du retour *réflexif* (ang. *feedback*) permettant de situer son action par rapport au but fixé et d'une *guidage* permettant d'adapter l'action au but visé.

Nous avons pu aborder cette question à travers trois évaluations utilisateurs de l'installation interactive *Double Skin/Double Mind (DS/DM)*, que nous avons élaborées dans le cadre de notre collaboration avec la compagnie de danse EG | PC et que nous décrivons dans le présent chapitre. Nous invitons le lecteur à se référer à la section 3.5 pour plus de détails concernant l'installation *DS/DM*. Cette installation a été développée afin de permettre aux participants d'apprendre, d'expérimenter, de s'entraîner au vocabulaire de la compagnie. Les photos de la figure 8.1 représentent une danseuse qui exécute les composants de *DS/DM* et interagit avec les visuels dans l'installation.

Le tableau 8.1 résume les différents aspects liés aux dimensions évaluées dans nos trois études. Plus précisément, la première étude, menée avec 4 danseuses (dont une danseuse professionnelle d'EG|PC), a pour objectif d'observer le comportement des danseuses dans l'interaction avec les visuels proposés. De plus, elle examine leur perception de la dimension

interactive, rétroactive et réflexive des visuels.

La deuxième étude a pour but d'évaluer le système avec un plus grand échantillon de participants, composé exclusivement de danseurs experts en *DS/DM*. Elle permet aussi de vérifier la consistance des résultats de la première expérience en termes de perception de l'interaction et de la rétroaction, avec des participants experts.

Enfin, la troisième étude menée a pour but d'évaluer l'installation dans un contexte pédagogique. En plus des dimensions évaluées lors de la première étude, cette troisième étude examine l'expérience utilisateur (UX) de l'interaction et sa valeur pédagogique, et ce auprès d'un plus grand échantillon de participants, composé d'étudiants en danse, non experts en *DS/DM*.

Evaluation de ...	Etude 1	Etude 2	Etude 3
Comportement des danseurs pendant l'interaction	X		
Interaction : influence du danseur sur les visuels	X	X	X
Rétroaction : influence des visuels sur le danseur	X	X	X
Réflexivité : les visuels reflètent les QM	X		X
Expérience Utilisateur (UX)			X
La compréhension des utilisateurs des QM			X
Reconnaissance des QM par le système		X	
Temps passé dans l'interaction		X	

TABLE 8.1 – Tableau récapitulatif de l'ensemble des dimensions abordées par les trois évaluations de *DS/DM*.

## 8.2 Implémentation

Dans l'installation *DS/DM*, nous avons implémenté un système reposant sur les deux couches logicielles : la captation et reconnaissance des composants de *DS/DM*, puis le rendu visuel par MSS fins. Nous les détaillons tour à tour.

### Captation et reconnaissance des composants de *DS/DM*

L'étape de captation video du mouvement est décrite dans la section 4.4.1. Elle permet d'obtenir la silhouette du participant à partir d'une caméra infra-rouge et de calculer la largeur, la hauteur, le centre de gravité et la boîte englobante de cette silhouette captée ainsi que les positions de la tête, des mains et des pieds. A partir des données issues de l'étape de captation,



FIGURE 8.1 – Une danseuse qui interagit avec les visuels de DS/DM en exécutant le *breathing*, *jumping*, *expanding* et *reducing*

nous calculons un ensemble de descripteurs de qualités de mouvement. Afin de reconnaître automatiquement les composants de *DS/DM* qui englobent différentes qualités de mouvement, nous avons combiné un algorithme de suivi et de reconnaissance de geste appelé *Gesture Follower* (GF) avec, en entrée, nos descripteurs du mouvement décrivant les qualités étudiées. L'ensemble de ce système est décrit dans la section 4.4 de ce manuscrit.

Le GF requiert une phase *off line* dite d'entraînement de modèles de Markov cachés, reposant sur des exemples représentatifs de chaque composant

du vocabulaire. Nous avons donc enregistré un ensemble de 11 exemples de référence correspondant aux 11 nuances des composants de *DS/DM* exécutés par Bertha Bermudez. Ces nuances sont décrites dans la section 3.5 et sont les *growing*, *ramification*, *exploring*, *gentle rebounding*, *shoulder breathing*, *breaking action*, *open boundaries*, *transfer of balance*, *articulated rhythm*, *thick air* et *freeze*.

La phase de reconnaissance, estime en temps réel les valeurs de vraisemblance, qui représentent les similarités entre le mouvement réalisé par l'utilisateur et chaque nuance de *DS/DM* préenregistrée pendant la phase d'entraînement. La classe qui obtient la vraisemblance la plus élevée est considérée comme étant la classe du geste réalisé par le participant.

### Contrôle des visuels par MSS fins

Nous nous basons sur les résultats de l'expérience décrite dans le chapitre 7 qui a montré que, selon leurs paramétrages, les MSS sont capables de générer des comportements dynamiques perceptivement similaires (au sens de similarité « physico-réaliste ») à des qualités de mouvement. Ainsi, pour que les comportements des visuels de *DS/DM* reflètent les qualités de mouvement des participants, nous avons développé un contrôle gestuel qui associe certains paramètres de MSS à ceux décrivant les qualités de mouvement détectées. Ce contrôle gestuel est décrit dans la section 5.6.1 de ce manuscrit.

Dans l'installation, les participants contrôlent des visuels basés sur des MSS d'échelle fine et de topologie carrée, à partir de leur exécution des qualités de mouvement de *DS/DM*. La visualisation et le contrôle de ces MSS sont présentés dans le paragraphe 5.5. Ce contrôle, décrit en section 5.6.1, consiste à associer les descripteurs des gestes aux paramètres des MSS afin de générer des comportements dynamiques « similaires » aux composants de *DS/DM* exécutés. Nous avons conçu quatre différents « mappings » qui sont appliqués suivant le composant de *DS/DM* exécuté par l'utilisateur qui est estimé par la couche de reconnaissance de qualités de mouvement.

## 8.3 Première étude de l'installation *DS/DM*

L'objectif de cette étude est d'examiner, d'une part, le comportement des participants dans l'interaction avec les visuels proposés dans *DS/DM*. D'autre part, elle évalue leur perception des dimensions interactive et réflexive de tels visuels. Ici, on entend par dimension réflexive, la capacité des visuels, en tant que *feedback*, à refléter les qualités de mouvement des participants. Pour cela, nous avons effectué une série d'expérimentations et de courts entretiens semis-dirigés avec quatre danseuses présentes pendant une semaine de résidence où l'installation était ouverte au public.

Comme nous l'avons discuté dans la section 2.4 portant sur l'état de l'art de ce manuscrit, les interactions conçues dans un contexte artistique défient souvent les techniques d'évaluation « traditionnelles » en IHM. Tout comme pour les interfaces musicales, les interfaces gestuelles qui s'adressent aux danseurs impliquent des aspects créatifs et ne définissent pas de tâches pour lesquelles, par exemple, des taux de réussite peuvent être mesurés (Stowell *et al.*, 2009). De plus, généralement, la population des sujets qui peut participer à l'évaluation de telles interactions est de petite taille, pour peu qu'elle nécessite des danseurs professionnels ou amateurs ayant une connaissance d'une technique de danse particulière. Par exemple, pour cette première évaluation de *DS/DM*, nous n'avons pu recruter que trois danseuses sans connaissances préalables de l'atelier de *DS/DM* et une danseuse professionnelle avec une grande expertise de *DS/DM*. Par conséquent, nous avons choisi d'utiliser des méthodes pouvant être appliquées à un petit échantillon de participants, à savoir des entrevues semi-dirigées dont les données sont analysées par une méthode d'analyse de discours.

### 8.3.1 Participants

L'installation *DS/DM* a été ouverte au public au cours d'une semaine de résidence à l'Espaço do tempo à Montemor au Portugal. De nombreux visiteurs ont circulé et testé par curiosité et de façon créative, l'installation. Pour cette évaluation, nous avons recruté quatre danseuses (P0, P1, E1 et P3) présentes lors cette semaine de résidence, toutes des femmes entre 20 et 35 ans avec une pratique de la danse qui dépasse les dix ans. Leur utilisation des technologies pour la danse variait : certaines avaient une expérience courte et d'autres une grande expérience, notamment en conception d'installations interactives pour la danse.

### 8.3.2 Procédure expérimentale

Les participantes ont effectué seules une session expérimentale, puis une session d'entrevue semi-dirigée. Il n'y avait pas de public lors de l'expérimentation et l'installation était montée au centre d'une pièce qui lui était dédiée. Pendant l'expérimentation, chaque danseuse était à l'intérieur de l'espace de l'installation et l'évaluateur (moi-même) étais assis derrière. La figure 8.1 représente la danseuse P1 qui exécute les composants de *DS/DM* tout en interagissant avec les visuels par modèle physique. Les sessions expérimentales et les sessions d'entrevue ont été filmées. Notre évaluation prend en compte les éléments issus des enregistrements vidéo des sessions expérimentales et des entrevues. Une vidéo d'une session expérimentale avec la danseuse P0 est disponible en ligne<sup>1</sup>.

1. Vidéo de la session expérimentale de la danseuse P0 :  
<http://sarah.alaoui.free.fr/DSDM/DSDMExperiment.mov>

Au cours des sessions expérimentales, les danseuses ont été invitées à entrer dans l'espace de l'installation afin d'expérimenter le système. Pendant qu'elles dansaient, les visuels interactifs étaient projetés sur l'écran en face d'elles. Elles pouvaient rester dans l'espace de l'installation autant de temps qu'elles le souhaitaient, avec la consigne de danser en utilisant les qualités de mouvement issues des composants de *DS/DM* et en prêtant attention aux effets visuels. Pour être en mesure de faire cela, les danseuses avaient besoin d'avoir une connaissance préalable des composants de *DS/DM*.

La danseuse P0 qui a longtemps été la danseuse principale de EG | PC, a été impliquée dans la conception de *DS/DM*, à travers des semaines d'atelier dédiées à l'installation qui ont eu lieu tout au long de ma première année de doctorat. Elle est coauteur de notre article (Fdili Alaoui *et al.*, 2013) traitant de l'installation et de cette expérience. P0 a pris part à cette expérience et a fait des retours en tant qu'experte du vocabulaire de la compagnie. Grâce à sa grande connaissance de l'installation, P0 a appréhendé, expérimenté et verbalisé son interaction avec les visuels d'une façon tout à fait distincte de celle des autres participantes. Par exemple, elle a pu essayer l'interface librement et sans avoir besoin de consignes alors que les trois autres danseuses qui étaient moins familières avec le vocabulaire d'EG | PC et l'atelier *DS/DM*, avaient besoin d'une exploration guidée de l'installation. Effectivement, P1, P2 et P3 ont été amenées à regarder des extraits vidéo où Emio Greco explique et exécute des composants de *DS/DM*. Elles ont aussi dû suivre, comme condition préalable, le « demo level » de l'installation décrit dans la section 3.5 de ce manuscrit, qui est conçu comme une introduction à *DS/DM*.

A posteriori, nous avons conduit des sessions d'entrevue semi-dirigées avec les danseuses au sujet de leur interaction avec les visuels. Les questions posées pendant les entrevues concernent les deux dimensions étudiées :

1. La dimension interactive : les danseuses ont-elles eu conscience de l'interaction ? Pour ce faire, nous leur avons demandé : pensez-vous que le système a réagi à vos mouvements ou est-ce que vous avez réagi au système ?
2. La dimension réflexive : les danseuses ont-elles perçu que les éléments visuels représentaient les composants de *DS/DM* qu'elles effectuaient ? Est-ce que les visuels généraient des mouvements avec des qualités similaires à celles des participantes ? Pour répondre à cette question nous leur avons demandé : avez-vous perçu les composants de *DS/DM* dans la dynamique des visuels ?

### 8.3.3 Analyse des données

Comme la population d'essai est de petite taille, une analyse statistique semble inappropriée pour tirer des conclusions générales. Nous adoptons donc, une approche qualitative d'analyse des réponses aux entrevues. Précisément, nous suivons une méthodologie d'analyse de discours thématique des enregistrements vidéos des sessions d'entrevue qui permet de déterminer les thèmes développés dans le discours. Pour réaliser cette tâche, on procède en deux étapes : la détermination des unités significatives et leur catégorisation.

1. La retranscription des vidéos des entrevues enregistrées : nous avons utilisé un style d'annotation qui prend en compte les pauses, les disfluences (i.e. les marques de l'oral spontané liées à la construction progressive d'un énoncé) telles que les répétitions, les pauses et les hésitations ainsi que les informations paraverbaux telles que les rires, toux ou les murmures.
2. La décomposition du corpus en unités de transcription : la décomposition est traitée par extraction d'unités délimitées par des pauses.
3. L'objectivation des unités de transcription : nous extrayons l'objet principal auquel on se réfère. Les pronoms déictiques (par rapport à leur référent dans l'expérimentation) ou les pronoms anaphoriques (par rapport à leurs antécédents dans le discours) sont résolus, en utilisant la terminologie propre du participant.
4. L'extraction de catégories à partir des données transcrites : les concepts avec le plus grand nombre d'occurrences, seront regroupés en catégories. Les catégories associées doivent être décrites sur un ensemble de dimensions, de taille minimale mais suffisante.
5. Le codage consiste alors à caractériser chaque dimension d'analyse.

Le paragraphe suivant présente les conclusions obtenues à partir de l'analyse des enregistrements vidéo des sessions d'entrevues qui nous ont permis de collecter les retours des participantes suite à leur expérience de l'installation. De plus, les enregistrements vidéo des sessions expérimentales ont fourni des éléments supplémentaires pour l'interprétation des retours des participantes. Notez que la transcription et le codage des entrevues est disponible sur le lien en ligne suivant<sup>2</sup>.

### 8.3.4 Observations issues des sessions expérimentales

Les enregistrements vidéo des sessions expérimentales montrent que le temps passé dans l'installation diffère d'une danseuse à une autre. P1 a

---

2. L'analyse de discours des entrevues enregistrées :  
<http://sarah.alaoui.free.fr/DSDMAnalysis>



passé plus de 10 minutes dans l'installation, P2 plus de 4 minutes, P3 environ 3 minutes et P0 a passé environ 2 minutes dans l'installation. Tout d'abord, et afin de comprendre l'interaction, chacune d'elles a commencé par alterner entre des mouvements continus et des postures fixes. Les visuels répondaient clairement en alternant entre leurs différents comportements et la configuration de référence. Par la suite, les danseuses ont adopté des stratégies différentes.

L'expérimentation de la danseuse P0 était brève, mais très satisfaisante et ce, en raison de sa grande expertise de l'installation ainsi que de sa capacité à effectuer avec précision, fluidité et confiance, les composants de EG |PC. Les visuels ont donc été en mesure de détecter toutes ses qualités avec une grande précision et y ont répondu clairement et immédiatement. Sa performance de 2 minutes a été façonnée en un enchaînement de danse intégrant toutes les nuances existantes des composants. Dans son enchaînement, elle a également exploré les transitions entre les comportements des visuels correspondant aux transitions entre ses différentes qualités de mouvement.

Contrairement à la danseuse P0, les danseuses P1, P2 et P3 ont exprimé quelques hésitations en particulier au début de leur performance. Par exemple, au début, P1 ne semblait pas comprendre la réponse des visuels. Par conséquent, elle a demandé tout en dansant : *Devrais-je le suivre ou doit-il me suivre ?* Elle a ensuite répondu à sa propre question *Ah ! C'est l'interaction !* P3 a commencé à exécuter des mouvements lents et hésitants qui sont devenus de plus en plus assurés tout au long de la session expérimentale. Quant à P2, elle a effectué des petits mouvements, lents, sans énergie et hésitants tout au long de la session expérimentale. Par conséquent, les visuels ont soit répondu à ses mouvements avec peu d'ampleur et un comportement réduit, soit ils n'ont pas répondu et sont restés en configuration de référence. P2 avait adopté une stratégie qui consistait à répéter trois fois une séquence composée des quatre composants de DS/DM. Même si les visuels ont globalement peu répondu à ses mouvements, on a pu constater une amélioration de la réponse au fur et à mesure qu'elle répétait la séquence. Il semblait que plus elle répétait les composants, moins ses mouvements étaient hésitants, et plus elle était en mesure de percevoir les réponses visuelles.

P1 et P3 ont exploré les retours des visuels pour chaque composant de façon indépendante. P1 a pris plus d'une minute pour répéter chaque composant alors que P3 a pris moins de temps. Elles ont toutes les deux accentué leurs mouvements tant qu'elles n'étaient pas satisfaites du comportement des visuels. Une fois qu'elles avaient obtenu une réaction satisfaisante, elles ont mémorisé leurs qualités et sont passées au composant suivant. De plus, P1 a terminé sa performance en jouant avec le système et en inventant un

enchaînement de danse complet englobant les quatre composants et leurs qualités que le système a détectés systématiquement et auxquels il a répondu de façon claire, créant un dialogue visible avec la danseuse.

Après avoir expérimenté les quatre composants, P0, P1 et P3 ont effectué de nouveaux mouvements qui n'ont pas été pris en compte dans d'interaction. Elles ont essayé de « piéger » le système. Par exemple, P1 a effectué des rotations, des rebonds des mains et du corps, des marches, des courses, des sauts et des arrêts. Elle alternait entre des positions frontales et latérales ou des positions de profil par rapport à l'écran, à droite et à gauche, au sol ou debout. Cependant, elle s'est alors rendu compte que la caméra (qui est au-dessus de l'écran) capturerait sa silhouette en 2D seulement. Elle s'est alors remise à danser debout et face à l'écran. P3 a effectué d'autres mouvements de danse classique comme des « arabesques » ou des « jetés » mais les visuels n'ont pas répondu à cela. Elle a effectué des déplacements du corps de droite à gauche et les visuels ont réagi avec un comportement correspondant à *l'expanding*. P0 a pu « piéger » le système en effectuant un mouvement de rebond répétitif impliquant uniquement son bras droit, que le système a détecté et associé à un comportement de *jumping*. P0 a d'ailleurs exprimé sa satisfaction au moment de quitter l'installation en levant le pouce vers le haut.

### 8.3.5 Interprétation des entretiens

Nous décrivons dans cette section, notre analyse des entretiens que nous avons conduits avec les quatre danseuses.

#### a) La dimension interactive et rétroactive

Toutes les danseuses ont estimé que les visuels ont effectivement répondu à leurs mouvements. Cela confirme que les visuels sont bien perçus comme un outil réflexif. Elles ont répondu à la question : « Pensez-vous que l'objet interagit avec vous ? » (le mot « objet » se réfère aux visuels affichés) ainsi :

- P0 : *Oui, complètement. oui, oui.*
- P1 : *Oui, je pense.*
- P2 : *J'ai complètement remarqué qu'il y avait un dialogue avec l'objet sur l'écran.*
- P3 : *Oui, j'ai pensé qu'il était interactif, parce que je sentais qu'il me suivait, je veux dire qu'il avait en quelque sorte mon énergie*

Au niveau de la rétroaction, i.e. l'influence des visuels sur les mouvements des participants, P2 a réfuté cet aspect du système et a avancé que le système n'avait aucune influence sur elle : *Si cela m'influçait ? euh, non, parce que j'ai eu l'impression que j'étais l'acteur et que ça faisait quelque chose. En fait, j'ai été celle qui influçait l'objet.* La danseuse P1 pensait que, outre le fait que les visuels étaient une réponse réflexive, ses propres mouvements ont

été influencés par les visuels : *Parfois, je suis dans le doute [hésitation] si je dois suivre l'objet, parfois, je ne suis pas sûre.*

Même si certaines participantes ne l'ont pas verbalisé, en observant des vidéos enregistrées des sessions d'expérimentation, il semblait que les mouvements de toutes les participantes étaient influencés par les effets visuels. Puisqu'elles ont toutes perçu le système comme une réponse à leurs mouvements, il était clair qu'elles ont toutes « joué » avec lui, adaptant leurs mouvements à ses réponses, explorant toutes les réponses possibles suivant les différentes qualités qu'elles pouvaient exprimer corporellement, et même en essayant parfois de trouver les limites du système.

### b) La dimension réflexive

Est ce que les danseuses perçoivent que les visuels représentent les composants de DS/DM qu'elles ont effectués ?

Généralement, toutes les participantes ont perçu les quatre principaux composants de DS/DM dans les visuels : *breathing, jumping, expanding, et reducing* avec plus ou moins de clarté. Cependant, elles étaient parfois incapables de se rappeler de la dénomination des composants.

- P0 a distingué clairement les quatre composants. En raison de son expertise du vocabulaire de EG |PC, elle a exécuté les qualités de mouvement dans une telle exactitude que le système a toujours répondu correctement et clairement à ses mouvements. Elle répond de manière positive au fait qu'elle avait perçu les quatre composants.
- P1 a distingué les quatre composants de DS/DM dans le comportement graphique : *habituellement avec le jumping, je pouvais voir ce rythme et je euh, je l'ai senti plus interactif [...] j'ai perçu l'expanding et le reducing, et ce genre de position [signe de la main représentant le breathing].*
- P2 a perçu l'*expanding* et le *reducing* comme étant les plus clairement représentés mais n'était pas en mesure de les mémoriser facilement : *Si je m'étire, il [se réfère au visuel] s'étire aussi, comme si les dimensions de l'objet changent [...] Et si je réduis [signe de la main signifiant réduire le corps] [...] avec mon corps, mon mouvement, il [se réfère au visuel] se réduit aussi.*
- P3 a perçu le *jumping* comme la qualité la plus clairement représentée : *quand j'ai commencé à sauter et [signe d'hésitation] [...] on pouvait voir les différentes dynamiques par rapport à la première fois quand je faisais simplement un breathing in et breathing out, où il [se réfère au visuel] allait plus lentement.*

Les danseuses qui étaient modérément familières avec le vocabulaire de DS/DM, ont parfois une lecture surprenante de la relation entre leurs mouvements et les visuels. Par exemple, la danseuse P1 a perçu une dynamique de *rotation* en réponse à la sienne.

P2 et P3 ont perçu une relation directe entre leur énergie et les visuels. P2 a compris l'interaction comme une réponse ou une *projection* de son énergie sur l'écran : *j'ai eu l'impression que j'ai projeté ce que je faisais sur lui [lui se réfère au visuel] et il s'adapte à ma vitesse ou à la dimension de mon mouvement [...] j'ai pensé qu'il était intéressant, c'est comme si j'étais capable de manipuler ce que je voyais à l'écran. C'était intéressant pour moi et parfois s'il ne réagissait pas immédiatement de la manière dont je bougeais ou je modifiais mon mouvement [mouvement de la main se référant à la respiration] Je me demandais comment ça se faisait, pourquoi ne faisait-il pas la même chose, pourquoi ne s'étendait-il pas aussi, mais alors éventuellement, il le faisait. Alors ça c'était intéressant.* La danseuse P3 a compris que l'interaction était possible uniquement lorsque son mouvement était énergique : *Il suivait mon mouvement quand il était plus intense, disons, quand il était le plus dynamique, il avait mon énergie.* Ainsi, elle distingue les visuels d'un miroir, parce qu'elle les qualifie de *vivants*.

La danseuse P0 qui maîtrisait le vocabulaire de EG | PC a eu une lecture très précise de l'interaction. Elle a indiqué que les visuels *mettaient l'accent sur les différentes dynamiques du mouvement. Ils se comportent différemment pour donner un sens aux différentes dynamiques de mes qualités du mouvement.* La dimension réflexive du système était très évidente pour elle : *Cet objet ne m'informe pas sur la façon dont le système me regarde, mais c'est en fait une réponse à mon action. Donc, il est une représentation visuelle de ce que je fais.* Les réponses de P0 révèlent que plus le participant a une connaissance approfondie de EG | PC, plus son interprétation de l'interaction avec les visuels est pertinente. Bien sûr, la lisibilité croissante peut aussi s'expliquer par le fait que le système répond mieux aux participants qui maîtrisent les qualités de mouvement requises pour interagir avec le système.

### c) La dimension attentionnelle

La danseuse P1 a déclaré que les visuels capturaient son attention. Elle a pris l'initiative de mentionner ce point au cours des entretiens en disant : *Je pense que j'ai été tellement fixée à l'avant, et parfois je voulais tourner [rire] et les voir [les se réfère aux visuels] autour de moi.* En analysant les vidéos de l'expérience, on peut remarquer qu'à certains moments, certaines des participantes dansaient en oubliant de regarder les visuels projetés. Dans ce cas, il est clair qu'elles n'ont pas interagi avec eux. Cette dimension attentionnelle semble être un point récurrent car il ressort des retours des participants que nous avons collectés dans l'ensemble des évaluations présentées dans ce chapitre.

#### d) Synthèse

Il est certes difficile de déduire des conclusions générales à partir de cette évaluation qualitative menée avec seulement quatre danseuses. Cependant, leurs retours révèlent, que notre système interagit clairement avec elles et génère des comportements qui reflètent les quatre composants de *DS/DM* qu'elles ont exécutés. De plus les comportements visuels générés semblaient avoir une influence sur leurs performances des qualités de mouvements.

Ces résultats encouragent l'utilisation de tels visuels interactifs dans un contexte pédagogique où ils correspondraient à un dispositif de médiation du processus de régulation de l'apprentissage (Piaget, 1974). Effectivement, le système propose un retour *réflexif* permettant de situer son action par rapport à un but fixé lié à la similarité perçue entre le comportement du modèle et la qualité exécutée. De plus, le système encourage à adapter l'action au but visé (*guidage*).

### 8.4 Deuxième étude : retours des danseurs d'EG|PC sur *DS/DM*

Afin de compléter l'étude précédente, où seule une des danseuses était experte de *DS/DM*, nous avons conduit une deuxième étude ayant pour participants l'ensemble des danseurs professionnels de la compagnie EG|PC. L'objectif de cette étude est, d'une part, d'évaluer la façon dont le système répond aux utilisateurs experts. D'autre part, l'étude évalue la perception des danseurs d'EG|PC, de la réponse visuelle, et de son influence sur leur performance des qualités de mouvement de *DS/DM*.

#### 8.4.1 Participants

L'installation a pour but de permettre à des danseurs d'apprendre, d'expérimenter, et de s'exercer au vocabulaire de la compagnie. Elle n'a donc pas pour cible, à priori, les danseurs professionnels d'EG |PC, mais plutôt des danseurs qui n'ont pas encore une grande expertise du vocabulaire de la compagnie.

Cependant, il était intéressant d'évaluer notre système du point de vue de l'utilisateur et particulièrement des danseurs professionnels de la compagnie car ils ont une grande connaissance du vocabulaire requis, puisqu'ils s'entraînent quotidiennement à l'aide de l'atelier *DS/DM*. Nous avons donc recruté pour cette expérience les 10 danseurs de la compagnie, dont 3 hommes et 7 femmes, et leur avons demandé d'expérimenter l'interaction avec les visuels (sous des conditions expérimentales variées). Nous leur avons aussi demandé de répondre à des questionnaires évaluant la dimension interactive et rétroactive des visuels. Ici, par dimension rétroactive, on entend

l'influence exercée par les visuels en tant que *feedback* sur la performance des composants par les danseurs.

### 8.4.2 Procédure Expérimentale

Nous constituons deux conditions expérimentales correspondant à deux modes d'interaction en manipulant le niveau d'interactivité du dispositif :

1. Un mode interactif, où les visuels répondent aux qualités de mouvement du danseur.
2. Un mode aléatoire, où les comportements visuels sont générés de façon aléatoire. Ces comportements ne sont pas liés aux qualités de mouvement des danseurs qui sont identifiés par le système de reconnaissance, mais restent similaires aux qualités définies dans *DS/DM*. Dans ce mode, les paramètres des visuels et les descripteurs du geste restent cependant actifs. Précisément, dans ce mode, le retour du système de reconnaissance déterminant la qualité de mouvement exécutée est remplacé par un processus aléatoire.

Cette expérience a été conçue en variations intra-participants, ce qui signifie que tous les danseurs ont été invités à entrer dans l'espace de l'installation et à expérimenter l'ensemble les conditions expérimentales. L'ordre de passage des conditions est aléatoire. Pendant qu'ils dansaient, les visuels interactifs étaient projetés sur l'écran en face d'eux. Ils pouvaient rester dans l'espace de l'installation autant de temps qu'ils le désiraient avec la consigne de danser en utilisant les qualités de mouvements de *DS/DM*. Nous n'avons donné aucune explication sur les visuels avant que les danseurs commencent l'expérimentation.

#### a) Questionnaire

A la suite de l'expérimentation de chaque mode d'interaction (la durée de l'expérimentation était arbitraire), les danseurs devaient répondre au même questionnaire. Ce questionnaire se composait d'une consigne et comportait des assertions regroupées en thématiques :

1. une thématique de perception des capacités interactives du dispositif (8 assertions) ;
2. une thématique de rétroaction qui examine si le « feedback » contribue à valoriser le sentiment de compétence et de réussite du danseur i.e. s'il l'encourage à réaliser des composants de *DS/DM* intentionnellement (12 assertions).

Pour répondre au questionnaire, les danseurs devaient évaluer les assertions de 0 à 4, où 4 correspond à « fortement d'accord » et 0 à « fortement en désaccord ». Nous avons obtenu pour l'échelle mesurant les capacités

interactives du dispositif (8 assertions), un coefficient alpha de Cronbach de 0,88. Pour l'échelle mesurant la perception de la rétroaction (12 assertions), nous avons obtenu un alpha Cronbach de 0,79. Rappelons que le seuil d'acceptabilité de l'American Psychological Association est de 0,7.

En plus du questionnaire, nous avons obtenu des données objectives qui se rapportent au temps passé dans l'installation ainsi qu'aux qualités de mouvement détectées par le système de reconnaissance. Ces dernières sont regroupées en 5 catégories possibles, les 4 premières se réfèrent aux qualités de mouvement étudiées, la dernière regroupe tous les éléments que le système n'identifie pas comme se rapportant aux qualités de mouvement de *DS/DM*. Dans le mode aléatoire, comme dans le mode interactif de cette expérimentation, la reconnaissance des qualités de mouvement du sujet est testée, et permet d'estimer une proportion de gestes identifiés par le système comme des qualités de mouvement de *DS/DM*, dans chaque mode. Cette proportion est calculée suivant le nombre de trames du mouvement qui sont reconnues dans les 4 catégories de *DS/DM*, sur le nombre de trames total.

Ces données objectives permettent d'évaluer si le mode interactif contribue à valoriser davantage (par rapport au mode aléatoire) la réalisation des composants de *DS/DM* ainsi que la réussite de cette réalisation.

### 8.4.3 Analyse des données

Nous avons analysé les données objectives et subjectives avec un test de mesures répétées (ANOVA) sur les scores obtenus pour chaque thématique et ensuite pour chaque assertion du questionnaire. Les résultats donnés dans les tableaux ci-dessous reportent la valeur de  $t$  qui représente le test d'adéquation à la loi de Fisher. La valeur de  $dl$  est le degré de liberté qui représente la taille de l'échantillon (en général les 10 danseurs qui ont répondu à l'assertion) moins un. Ces deux valeurs servent à calculer la valeur de  $P$ , la signification, qui indique s'il y a une différence significative (respectivement, tendancielle) entre les groupes comparés deux à deux, suivant si sa valeur est en-dessous de 0.05 (respectivement, 0.1).

### 8.4.4 Résultats

Nous décrivons dans cette section, nos résultats concernant l'évaluation de la façon dont le système répond aux danseurs d'EG|PC ainsi que leur perception du retour visuel et son influence sur leur performance de *DS/DM*.

	Moyenne (écart type)	<i>t</i>	<i>dl</i>	<i>P</i>
Mode Interactif	9748(3278)	1,45	9	0,18
Mode Aléatoire	6479(5369)			

TABLE 8.2 – La moyenne et écart type du nombre de trames de gestes reconnus suivant le mode d'interaction

	Moyenne (écart type)	<i>t</i>	<i>dl</i>	<i>P</i>
Mode Interactif	1316(1673)	0,64	9	0,53
Mode Aléatoire	872(1257)			

TABLE 8.3 – La moyenne et écart type du nombre de trames de gestes non reconnus suivant le mode d'interaction

**a) Mesures objectives : les taux de reconnaissance de gestes et la durée de l'interaction**

Premièrement, les résultats des tableaux 8.3 et 8.2 montrent que le système de reconnaissance a pu classifier 88% des gestes des danseurs comme un des quatre composants *DS/DM*, indiquant que les mouvements des danseurs étaient clairement identifiables par le système. Un tel taux n'avait pas été observé, dans l'étude précédente, avec les trois danseuses non expertes de *DS/DM*, alors que les algorithmes d'analyse du geste et de synthèse graphique étaient strictement identiques.

Dans l'ensemble, il n'y a pas de différence significative entre le mode aléatoire et le mode interactif par rapport à cette proportion d'identification du système (ces proportions pour les deux modes étant autour de 88%). Cela peut paraître surprenant, mais cela reflète simplement que dans les deux cas, les mouvements des danseurs n'ont pas varié de manière significative. Dans les deux cas, ils ont essentiellement dansé en se basant sur le vocabulaire d'EG|PC, qu'ils maîtrisent parfaitement.

Cependant, les danseurs ont passé 50% de temps en plus dans le mode interactif que dans le mode aléatoire. Cette donnée objective suggère que l'interaction favorise l'exploration des composants de *DS/DM* et encourage les danseurs à poursuivre chaque composant plus longtemps.

**b) Mesure subjectives : perception des capacités interactives du dispositif**

Bien que les danseurs n'aient pas eu d'explications sur le fonctionnement du dispositif, et qu'ils ne s'attendaient probablement pas à des visuels ré-



flexifs, ils ont tout de même eu tendance à percevoir une réponse des visuels plus « claire » dans le mode interactif que dans le mode aléatoire. Sur le plan de la perception des capacités interactives du dispositif, nous obtenons un ( $P = 0,1$ ), ce qui révèle qu'il existe une différence tendancielle favorisant le mode interactif par rapport au mode aléatoire. En particulier, les mouvements des visuels ont tendance à être considérés par les danseurs comme une **meilleure réponse** à leurs qualités de mouvement dans le mode interactif plutôt que dans le mode aléatoire (comme le montrent les résultats ( $P = 0,09$ ) reportés dans le tableau 8.4). De plus, les danseurs ont tendance à percevoir des visuels plus **vivants** dans le mode interactif que dans le mode aléatoire, comme le montrent les résultats ( $P=0,08$ ) du tableau 8.5.

	Moyenne (écart type)	$t$	$dl$	$P$
Mode Interactif	1,9(1,1)	1,86	9	0,09
Mode Aléatoire	1,0(1,4)			

TABLE 8.4 – Les résultats relatifs à l'assertion : « Les mouvements du visuel sont une réponse à la qualité de mes mouvements ».

	Moyenne (écart type)	$t$	$dl$	$P$
Mode Interactif	3.0(0,9)	1,96	9	0,08
Mode Aléatoire	2,4(1,1)			

TABLE 8.5 – Les résultats relatifs à l'assertion : « Les visuels sont vivants ».

### c) Mesure subjective : régulation de l'intention et rétroaction

	Moyenne (écart type)	$t$	$dl$	$P$
Mode Interactif	1,1(1,2)	-3,35	9	0,008
Mode Aléatoire	2(1,1)			

TABLE 8.6 – Les résultats relatifs à l'assertion : « J'avais l'intention d'imiter les qualités de mouvement des visuels ».

Pour l'ensemble de la thématique de régulation de l'intention, nous obtenons un ( $P = 0,1$ ), ce qui révèle qu'il existe une différence tendancielle favorisant le mode aléatoire par rapport au mode interactif. Ceci veut dire que les danseurs ont tendance à davantage danser avec l'intention d'exécuter certains gestes dans le mode aléatoire que dans le mode interactif. Cette différence tendancielle est due aux réponses à l'assertion reportée dans le tableau 8.6. Les résultats montrent que le processus intentionnel opère au niveau de l'imitation des visuels. Effectivement, les danseurs semblaient avoir significativement plus **l'intention** d'imiter les visuels et leurs qualités de mouvement dans le mode aléatoire que dans le mode interactif.

Ceci est cohérent avec les résultats obtenus pour l'ensemble de la thématique de rétroaction, ( $P = 0,06$ ), qui révèlent qu'il existe une différence tendancielle favorisant le mode aléatoire par rapport au mode interactif. En d'autres termes, les danseurs considèrent que le mode aléatoire a tendance à exercer davantage d'influence sur leurs mouvements (rétroaction) que le mode interactif. Cette différence est due aux réponses à l'assertion « J'ai été amené à imiter les effets visuels », dont les résultats sont reportés dans le tableau 8.7. Ils montrent que les danseurs ont été significativement plus **amenés** (en plus d'en avoir eu l'intention) à imiter les visuels dans le mode aléatoire que dans le mode interactif.

	Moyenne (écart type)	$t$	$dl$	$P$
Mode Interactif	1,1(1,1)	-2,44	9	0,036
Mode Aléatoire	2,1(1,5)			

TABLE 8.7 – Les résultats relatifs à l'assertion : « J'ai été amené à imiter les effets visuels ».

#### 8.4.5 Synthèse

Les résultats de cette expérimentation ont permis de montrer que le système de reconnaissance de qualités de mouvement développé identifie clairement les gestes des danseurs, pour peu qu'ils exécutent suffisamment bien les quatre composants  $DS/DM$ . De plus, l'expérimentation a démontré que les danseurs de la compagnie EG|PC ont tendance à mieux percevoir la réponse visuelle dans le mode interactif que dans le mode aléatoire et la considèrent même plus vivante. Ce résultat est cohérent avec le temps, bien plus élevé, passé par les danseurs dans le mode d'interaction prenant en compte leurs qualités du mouvement. Cependant les résultats du questionnaire ont révélé seulement des différences tendancielle et non significatives, voir pas de différences du tout pour certaines assertions, entre le

mode interactif et le mode aléatoire. Cela nous a amené à nous interroger sur l'appropriation du système. Souvent 5 ou 10 minutes d'essai ne suffisent pas pour que les danseurs distinguent les possibilités qu'offre une telle interaction selon s'ils expérimentent le mode interactif ou aléatoire. Pour cette raison, nous avons décidé d'inscrire l'expérience suivante dans un contexte réel d'apprentissage qui s'étale dans le temps et qui prend en compte les phases d'appropriation de l'outil.

Les résultats concernant la rétroaction montrent que le mode aléatoire a tendance à exercer davantage d'influence sur les mouvements des danseurs que le mode interactif. Ces résultats peuvent paraître surprenants au premier abord mais il est possible de les interpréter en se basant aussi sur l'observation qualitative des comportements des danseurs dans l'installation. Deux tendances se dégagent dans les comportements des danseurs suivant la nature de la réponse visuelle, aléatoire ou interactive. Dans le mode interactif, les danseurs comprennent que leurs mouvements ont un effet sur les visuels et n'essaient pas, en général, de les imiter intentionnellement. En revanche, dans le mode aléatoire, étant donné que les visuels ont des comportements non corrélés avec ceux exécutés, et en raison des attentes des danseurs en termes d'interaction, ceux-ci se mettent souvent à suivre physiquement le retour visuel pour créer le lien manquant. En d'autres termes, les danseurs semblent compenser le manque de réponse, dans le mode aléatoire, par l'imitation intentionnelle des comportements des visuels générés aléatoirement. Ce phénomène de compensation fait écho à la question récurrente posée par les danseurs après l'expérimentation du mode aléatoire : « qui suit l'autre ? ».

Enfin, nous avons été surpris durant cette expérimentation qu'une des danseuses de la compagnie demande, au moment de répondre au questionnaire et après dix minutes d'interaction avec les visuels : *Est-ce que j'étais supposée regarder l'écran ?* Ce problème est inhérent aux interfaces visuelles interactives et est particulièrement présent dans le cas de la danse, activité qui nécessite parfois une forte introspection et une conscience intérieure du corps. Effectivement, plusieurs danseurs contemporains ont tendance à fermer les yeux en dansant pour avoir plus de sensations du mouvement. Ce problème attentionnel, déjà soulevé lors de l'expérimentation décrite dans la section 8.3, nous a poussé à définir une « consigne » pour l'expérience suivante. Cette consigne consiste à demander aux participants de regarder attentivement les visuels en dansant. Ainsi, de même qu'ils doivent regarder leurs mouvements dans un miroir pendant un cours de danse, ils doivent prêter attention aux visuels pendant l'expérimentation.

## 8.5 Troisième étude : retours d'étudiants en danse sur DS/DM

Nous avons élaboré une troisième étude qui complète les deux premières, avec des types de participants et un protocole expérimental différents. L'objectif de cette étude est d'évaluer, d'une part, l'expérience utilisateur (UX) de l'interaction avec des visuels reflétant leurs qualités de mouvement. D'autre part, elle a pour but d'évaluer si les visuels peuvent être considérés comme un outil pédagogique qui reflète les qualités de mouvement des étudiants et en favorise l'expression.

Dans cette étude, nous avons profité de l'expérience précédente et des points de conception expérimentale soulevés, afin de réviser la méthodologie expérimentale. Tout d'abord, cette étude a été intégrée dans un stage de formation en danse organisé par la compagnie EG|PC, à destination des étudiants de la *Amsterdamse Hogeschool voor de Kunsten* (l'École d'Art d'Amsterdam). Ce stage avait pour but d'apprendre aux étudiants les principes de DS/DM en expérimentant, entre autres, l'installation DS/DM. Notre expérience s'inscrit donc partiellement dans un processus d'apprentissage et s'est étalée sur deux jours. Cependant, nous n'avons pas été en mesure de prendre en compte la phase d'appropriation complète de l'outil.

Durant cette étude, pour pallier le phénomène de compensation (i.e. la tendance à créer l'interaction en imitant l'artéfact lorsque sa réponse est moins perçue), et pour amener les participants à bien discerner leur relation avec les visuels, nous avons combiné un questionnaire allégé rempli par l'ensemble des étudiants avec des entrevues semi-dirigées que nous avons conduites avec une partie des étudiants. En plus de cela, afin d'appuyer les résultats, nous avons observé les comportements des étudiants pendant l'expérimentation.

### 8.5.1 Participants

Nous avons recruté 16 étudiants en deuxième année du cursus de danse contemporaine de l'école d'Art d'Amsterdam. Les 16 étudiants ont été invités à tester seuls le système. Il n'y avait pas de public lors de l'expérimentation et l'installation était montée au centre d'une pièce qui lui était dédiée. Pendant l'expérimentation, chaque étudiant était à l'intérieur de l'espace de l'installation et l'évaluateur était assis derrière lui/elle. A la suite de chaque condition expérimentale, les étudiants devaient remplir un questionnaire.

De plus, nous avons conduit des entrevues semi-dirigées avec quatre étudiants parmi les 16 (E0, E1, E2, E3, dont 2 femmes et 2 hommes âgés de 20 à 25 ans), qui se sont portés volontaires. Ces quatre étudiants ont dû tester les conditions expérimentales dans l'ordre croissant du niveau d'interaction à savoir : mode obscurité, puis mode aléatoire, puis mode interactif.

### 8.5.2 Procédure expérimentale

Avant d'expérimenter les différents modes proposés, les étudiants ont suivi un cours d'introduction aux principes de la compagnie EG|PC et de *DS/DM*. Ce cours a duré une demi-journée et consistait en une présentation orale donnée par une danseuse professionnelle et chercheuse de la compagnie. De plus, comme le montre la photo 8.2, les étudiants ont bénéficié d'une introduction à *DS/DM* en s'entraînant à l'intérieur de l'espace de l'installation l'aide des vidéos où Emio Greco explique et exécute les composants de *DS/DM*. Les étudiants suivaient les instructions d'Emio Greco et s'entraînaient à exécuter les composants de *DS/DM* comme lors d'un cours de danse. Grâce à cela, les étudiants pouvaient acquérir une connaissance de *DS/DM*, nécessaire avant d'expérimenter l'interaction avec les visuels.



FIGURE 8.2 – Initiation d'un groupe d'étudiants à l'installation *DS/DM* grâce au mode « workshop » où Emio Greco explique et exécute les composants de *DS/DM*.

Dans l'expérimentation précédente, le mode aléatoire et le mode interactif ne semblaient pas être assez distincts. Dans le mode aléatoire, indépendamment du composant exécuté par les participants, le système sélectionnait aléatoirement un des « mappings » possibles. Les visuels avaient donc des comportements « similaires » aux qualités de *DS/DM* même s'ils ne reflétaient pas celles exécutées. Pour remédier à ce problème, nous avons introduit un troisième mode radicalement différent où les participants dansent dans le noir. Cette condition expérimentale permet aux étudiants d'évaluer l'apport de la présence des visuels par rapport à leur absence. Pour

résumer, les étudiants expérimentent trois conditions expérimentales correspondant aux trois modes d'interaction suivants :

1. un mode obscurité, où les danseurs improvisent dans l'obscurité ;
2. un mode aléatoire, où les visuels sont affichés mais les comportements sont aléatoires et non contrôlés par les danseurs ;
3. un mode interactif, où les visuels sont affichés et les comportements répondent aux qualités de mouvement des danseurs suivant les composants de *DS/DM*.

L'expérience a été conçue en intra-participant, ce qui signifie que tous les étudiants ont effectué les trois conditions expérimentales. L'ordre de passage des conditions expérimentales était aléatoire.

Notre hypothèse est que plus nous enrichissons la modalité d'interaction, mieux les étudiants expérimentent l'installation. L'enrichissement de la modalité d'interaction est réalisé en termes de réponse visuelle, allant de l'obscurité totale où les étudiants ne disposent pas de visuels jusqu'à la réponse réflexive, où les étudiants disposent de comportements visuels qui reflètent leurs qualités de mouvement (voir figure 8.3).

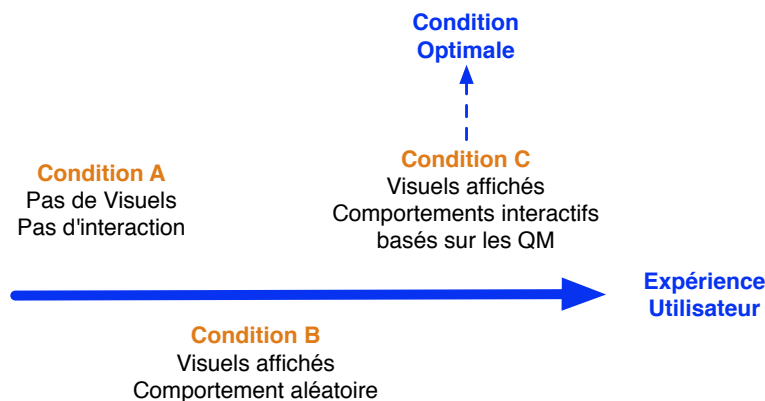


FIGURE 8.3 – Hypothèse sur les trois conditions expérimentales

### 8.5.3 Questionnaire et entretiens

A la suite de l'expérimentation de chacune des conditions, les 16 étudiants devaient répondre à un questionnaire UX. Le même questionnaire était à remplir pour les 3 conditions et explorait si :

1. L'expérience améliorerait leur expérience utilisateur de *DS/DM*.
2. L'expérience améliorerait leur compréhension des composants de *DS/DM*.
3. Les visuels avaient une influence sur leurs mouvements.

Pour répondre au questionnaire, les étudiants devaient évaluer les assertions de 0 à 4, où 4 correspond à « fortement d'accord » et 0 à « fortement en désaccord ». Nous avons obtenu pour ce questionnaire, un coefficient alpha de Cronbach supérieur à 0,8 (le seuil d'acceptabilité de l'American Psychological Association est de 0,7).

De plus, nous avons demandé aux quatre étudiants, avant de commencer l'expérimentation, de donner leur définition des composants de *DS/DM*. Nous leur avons aussi demandé d'imaginer des scénarios d'interaction entre leurs mouvements et les visuels disponibles, en leur montrant une image représentant les visuels. Précisément, nous leur avons posé la question : « Que voudriez vous que les visuels fassent lorsque vous exécutez les composants de *DS/DM* (*breathing, jumping, expanding, reducing*) ? ».

Après avoir expérimenté le mode aléatoire et le mode interactif, nous avons interviewé les quatre étudiants au sujet de leur expérience de l'interaction avec les visuels. Encore une fois, nos entrevues semi-dirigées étaient souples et leur permettaient de suggérer librement de nouvelles questions ou d'émettre des commentaires. Pendant ces entrevues, nous leur avons demandé de décrire les comportements générés par les visuels et de commenter l'influence de ces visuels dans leur compréhension et leur performance de *DS/DM*.

#### 8.5.4 Analyse des données

Nous avons analysé les données du questionnaire avec un test de mesures répétées (ANOVA) sur les scores obtenus pour chaque thématique et ensuite pour chaque assertion du questionnaire. Les résultats donnés dans les tableaux ci-dessous reportent encore une fois, la valeur du test  $t$ , du degré de liberté  $dl$  (qui représente la taille de l'échantillon, 16 danseurs) moins un, et de la valeur de la signification  $P$  qui indique s'il y a une différence significative (respectivement, tendancielle) entre les groupes comparés deux à deux, suivant valeur est en-dessous de 0.05 (respectivement, 0.1).

#### 8.5.5 Résultats

Nous décrivons dans cette section, les résultats des évaluations de l'expérience utilisateur (UX) de l'interaction avec les visuels ainsi que leur caractère pédagogique (reflètent-ils les qualités de mouvement des étudiants et en favorisent-ils l'expression ?).

##### a) Définition des composants de *DS/DM* par les étudiants

Nous rappelons que les réponses reportées dans ce paragraphe ont été données par les quatre étudiants durant les entrevues qui ont eu lieu avant l'expérimentation des trois modes d'interaction. L'ensemble des étudiants

a défini de façon homogène, les qualités du *breathing*, *jumping*. Les quatre étudiants ont défini le *breathing* comme une extension verticale de haut en bas jusqu'aux extrémités du corps, due à la respiration. De plus, ils ont tous défini le *jumping* comme un relâchement du corps produisant un rebond jusqu'aux extrémités du corps.

En ce qui concerne, *l'expanding*, la première réaction des étudiants est qu'ils ne s'en rappelaient pas. En se concentrant davantage, ils ont fini par s'en rappeler mais ils l'ont tout de suite assimilé au *breathing*. Pour les aider à comprendre *l'expanding*, nous leur avons alors demandé de réfléchir aux différences avec le *breathing* en termes d'espace et d'utilisation des jambes. E0, E1 et E2 ont indiqué que contrairement au *breathing* qui est uniquement vertical, *l'expanding* traverse l'espace dans différentes directions en 3D. Pour E1 et E2, *l'expanding* peut atteindre des extensions plus extrêmes et permet des mouvements en spirales, torsions et déséquilibres. E3 considère que *l'expanding* est plus lié à l'espace que le *breathing*. *En fait, c'est différent car on est dans l'espace plutôt que d'être à l'intérieur. Mais de l'extérieur, ils se ressemblent.* Par ailleurs, tous les étudiants considèrent que *l'expanding* nécessite un transfert de poids plus important

Pour définir le *reducing*, ils ont utilisé leurs propres métaphores. E1 a mentionné la métaphore du *miel*. E2 compare l'air autour de lui à un *brouillard*. E3 a mentionné que le mouvement crée une résistance à l'espace qui le conquiert. Enfin, pour E0 : *le reducing consiste à faire des gestes contrôlés plus petits mais pas pour autant moins importants.*

#### b) Comportement imaginé par les étudiants

Les réponses décrites dans ce paragraphe ont été données par les quatre étudiants durant les entrevues qui ont précédé l'expérimentation des trois modes d'interactions. Nous leur avons montré une image des visuels proposés, et leur avons demandé d'imaginer leur réponses lorsqu'ils exécutaient les composants étudiés.

Pour le *breathing*, tous les étudiants imaginent des visuels qui grandissent et rétrécissent dans les quatre directions (sauf E3 qui parle uniquement de la direction verticale).

Pour le *jumping*, tous les étudiants imaginent des visuels qui rebondissent de haut en bas. E1 parle de *rebond moelleux*. E0 veut que le *rebond résonne après que j'aie cessé mon mouvement et qu'il se réduise progressivement*. E3 désire que les visuels captent ses *qualités, directions et énergie du mouvement*.

Concernant *l'expanding*, tous les étudiants imaginent une extension des visuels dans toutes les directions en grandissant et en rétrécissant. E0 compare ce comportement des visuels à *un arbre ou une plante, quelque chose qui*



*se développe*. E2 évoque la métaphore *d'un objet qui bâille, quand j'atteins mes extrémités. J'imagine que l'objet va plus loin et continue à croître*. E0, E1 et E3 imaginent un mouvement de spirale et de rotation.

Concernant le *reducing*, E0 utilise la métaphore du sirop : *Le reste est comme la boisson, et si vous la concentrez vous obtenez le sirop. le reducing est aussi fort, mais il est plus petit*. E0 et E3 suggère de donner des couleurs aux visuels pour exprimer le *reducing*. Selon E0, *si l'objet avait une couleur bleue claire, alors en réduisant, je le verrais bien devenir plus sombre et plus petit*. Pour E2, il faut que les visuels expriment une résistance, qu'ils *tremblent comme s'ils essayaient de bouger, mais sans bouger*. Pour E3 il faut visualiser la *puissance à l'extérieur qui rapetisse l'objet*. E1 imagine une dynamique lente, sans rythme mais affirme préférer des visuels arrondis plutôt qu'une forme carrée angulaire, pour le cas du *reducing*.

### c) La dimension réflexive

Nous avons recueilli les réponses des quatre étudiants aux entrevues semi-dirigées ainsi que les réponses aux questionnaires remplis par l'ensemble des 16 étudiants à la suite de l'expérimentation des trois modes d'interaction. Dans le mode interactif, tous les étudiants ont perçu de façon cohérente les comportements générés par les visuels. Ils ont perçu que les visuels grandissaient et rétrécissaient verticalement pendant le *breathing* et qu'ils rebondissaient verticalement pendant le *jumping*. Ils ont tous perçu que, pendant l'*expanding*, les visuels se développaient dans différentes directions de l'espace et créaient des formes en 3D. Enfin, ils ont tous perçu que, pendant le *reducing*, les visuels rétrécissaient lentement. E3 définit les visuels dans le mode interactif comme *une image d'une façon humaine de se déplacer [...] des formes créant des qualités de mouvement*. Cependant, elle a mentionné que le *reducing* était moins clair que les autres comportements car *le rétrécissement y est plus une forme qu'une qualité*. Elle a insisté sur le fait qu'elle aurait préféré voir *une pression de l'extérieur, une sorte de tempête qui souffle en affectant la forme des visuels*.

La présence de visuels interactifs comme outil réflexif semble encourager chez les étudiants l'exécution des composants de DS/DM. E2 utilise ce retour réflexif dans sa pratique : *c'était agréable de savoir que : ok si je le fais comme ça [signe de la main désignant une grande lenteur et viscosité] il [désigne le visuel] le comprend ! C'était agréable de constater que lorsque j'éclatais le mouvement, lui aussi, il éclatait*. De plus, E2 pense que l'obscurité n'encourage pas l'exécution du mouvement car il n'y a pas d'éléments externes (réflexifs) le motivant. Il pense que lorsque *l'on est sa propre motivation, on se laisse toujours un peu aller à la paresse*. Par conséquent, E2 a senti que dans le mode obscurité, *il n'avait pas pu atteindre le mouvement désiré*. De son côté, E1 s'est senti *claustrophobe* dans le mode obscurité et a eu envie de danser de façon

aléatoire (sans intégrer les composant de DS/DM).

**d) La dimension rétroactive : l'influence des visuels sur les étudiants**

	Moyenne (écart type)	<i>t</i>	<i>dl</i>	<i>P</i>
Mode aléatoire	3,8(0,4)	-2,3	9	0,04
Mode interactif	3,0(1,0)			

TABLE 8.8 – Les résultats relatifs à l'assertion : « les visuels ont une influence sur ma performance »

Comme le montre l'expérience précédente et comme le confirment les résultats reportés sur le tableau 8.8, les étudiants ont tendance à être significativement plus influencés par les visuels lorsque leur réponse est moins claire. Précisément, ils perçoivent une influence significativement plus importante sur leur performance dans le mode aléatoire que dans le mode interactif. Encore une fois, lorsqu'on observe les comportements des étudiants dans l'installation, on constate que dans le mode aléatoire, ils compensent le manque d'interaction en imitant les comportements de DS/DM générés aléatoirement. En revanche, dans le cas du mode interactif, ils sont amenés à effectuer les composants de DS/DM le plus souvent pour manipuler les visuels à « leur guise ». Ceci est cohérent avec les retours des quatre étudiants pendant les entrevues. Dans le mode aléatoire, E3 a déclaré avoir été influencée par les visuels et avoir essayé de suivre leur énergie et leurs qualités. Pour elle, il était assez facile de les suivre car *ils proposaient des dynamiques et qualités très claires*. Elle a défini la relation entre elle et les visuels ainsi : *On essayait de rester ensemble ou de s'inspirer l'un l'autre. Pour moi, ils étaient une sorte d'inspiration*. En revanche, dans le mode interactif, E3 a trouvé *plus inspirant* de laisser les visuels la suivre.

Enfin, dans le mode interactif, E0 s'est questionné sur l'influence du modèle : *Il [désigne le visuel] réagit à moi, mais je ne sais pas comment réagir à lui*.

**e) L'amélioration de la compréhension des QM**

Les résultats du tableau 8.9 montrent que les étudiants considèrent que la présence de visuels contribue à une amélioration significative de leur compréhension des composants de DS/DM. Lors des entrevues, E3 a déclaré que *danser dans le noir, permet d'avoir des sensations internes mais pas de créer des formes*.

Cependant, les réponses à l'assertion « l'expérience améliore ma compréhension des composants de DS/DM », ne révèlent pas de différences significatives entre le mode aléatoire et le mode interactif. Cela peut être expliqué

	Moyenne (écart type)	<i>t</i>	<i>dl</i>	<i>P</i>
Sans visuels	1,9(0,8)	-2,3	9	0,04
Avec visuels	2,6(0,8)			

TABLE 8.9 – Les résultats relatifs à l’assertion : « l’expérience améliore ma compréhension des composants de DS/DM »

par le fait que dans le mode aléatoire, les visuels génèrent tout de même des comportements similaires aux qualités de DS/DM, sans pour autant être liés à celles exécutées par les participants. Les participants ont d’ailleurs tendance à fortement imiter ces comportements, comme le montre les résultats décrits ci-dessus concernant la dimension rétroactive. De ce fait, dans le mode aléatoire, les visuels jouent un rôle démonstratif qui peut permettre de construire une compréhension des principes de DS/DM. En revanche, dans le mode interactif, les visuels semblent jouer un rôle plutôt réflexif guidant l’utilisateur vers une compréhension corporalisée de DS/DM.

Ces interprétations sont appuyées par les réponses des danseurs aux entrevues. Selon E0, le mode aléatoire ne lui a pas permis d’improviser et les visuels ne l’ont pas aidé : *je me basais sur les visuels, mais ils étaient vraiment très lents et ne comprenaient pas ce que je faisais*. E2 a déclaré concernant le mode aléatoire : *j’ai essayé de bouger comme un fou et ils ne me suivaient pas [...] il n’y a pas eu de relation avec moi. Cela m’a amené à me demander si je n’étais pas en train d’exécuter la même qualité mais évidemment c’est faux*. Enfin, E3 a affirmé que les visuels interactifs lui permettent de comprendre davantage (que le mode aléatoire) la connexion entre les qualités et les formes du corps et d’avoir *plus de contacts avec l’extérieur*.

#### f) L’expérience de l’installation

	Moyenne (écart type)	<i>t</i>	<i>dl</i>	<i>P</i>
Sans visuels	1,8(0,9)	-2,0	8	0,08
Avec visuels	2,5(0,8)			

TABLE 8.10 – Les résultats relatifs à l’assertion : « le dispositif améliore mon expérience de DS/DM »

Les résultats reportés dans le tableau 8.10 montrent que la présence des visuels a tendance à contribuer à l’amélioration de l’expérience de DS/DM.

Cependant, les réponses à cette assertion ne révèlent pas de différence significative entre le mode aléatoire et le mode interactif. Les résultats statistiques de cette assertion ne nous permettent donc pas de tirer des conclusions sur le lien entre les niveaux d'interaction et l'amélioration de l'expérience de DS/DM. Cependant, en examinant les réponses aux entretiens, il semble que les quatre étudiants interviewés aient préféré l'expérience du mode interactif au mode aléatoire.

Les étudiants E0 et E2 ont exprimé leur *déception* lors de l'expérience du mode aléatoire. E2 a déclaré : *j'ai préféré le mode interactif car les visuels me suivaient !* A la suite du mode aléatoire, croyant que le modèle n'allait pas le suivre, il a décidé d'être très clair dans ses mouvements afin que la machine le comprenne. Il a été très heureux car il y a eu une réponse qu'il a décrite comme *active*. Il a trouvé que *c'était très motivant, c'était bien !*

E3 a rapporté que, dans le mode interactif, les visuels étaient *amusants*. Pour E3, il était plus agréable d'expérimenter l'installation que de travailler en studio, où cela consiste à avoir une tâche à faire. Selon elle, cette préférence est due au fait que les visuels permettaient de *jouer avec quelque chose de plus littéral*.

#### g) La latence

Les étudiants E0, E1, E2 et E3 ont soulevé le problème de latence du système qui les oblige à exécuter un composant, parfois plus longtemps qu'ils ne le désirent. Par exemple, E3 a trouvé que parfois, elle était contrainte d'exécuter un seul composant longtemps *car sinon il [se réfère au visuel] ne comprenait pas ce que je faisais*. Elle a dit pendant l'interview *il y a une latence, je devais rester dans le même qualité pour qu'il [se réfère au visuel] puisse réagir et pour obtenir les effets visuels. En ce sens, je sentais que ça ne me permettait pas d'être à 100% créative, car je devais rester avec la même pensée pendant un temps pour qu'il réagisse avec moi. Mais je comprends que la machine ait besoin de temps pour s'installer dans la qualité*.

#### h) La dimension attentionnelle

Par ailleurs, les étudiants ont questionné l'aspect attentionnel lié à l'interaction avec les visuels. Pour E0, *toute l'attention est portée sur la machine afin qu'elle comprenne le mouvement*. Il a déclaré : *je ne suis pas vraiment concentré sur mon mouvement et ce que je suis vraiment en train de faire [...] cela me dérange*.

E2 et E3, en revanche, valorisent cet aspect. Dans le mode interactif, E2 a mentionné *je ne prête pas attention à : « est-ce que ce que je fais est joli ? »* Je faisais juste. *C'était agréable de laisser aller l'idée de ce qui est bon ou de ce qui est mauvais*. Cela rejoint les retours de E3 qui considère que dans le mode

interactif, elle était moins prise avec ce qu'elle faisait elle-même et bien plus prise par le jeu. Toutefois, E3 nuance son propos en mentionnant que regarder continuellement les visuels est contraignant.

### 8.5.6 Synthèse

Les résultats de notre expérimentation montrent une similitude entre le comportement visuels imaginé par les étudiants et celui qu'ils ont perçu à la suite de l'expérimentation du mode interactif. Les visuels leur apparaissent comme un outil réflexif qui les aident à avoir une compréhension corporalisée de *DS/DM* et qui les encourage à en exécuter les composants. Cependant un autre type de compréhension des composants *DS/DM* semble provenir du mode aléatoire dont les comportements générés sont assimilés à *DS/DM* même s'ils ne sont pas liés à ceux exécutés par les participants. Ils jouent ainsi un rôle démonstratif et ont une forte influence sur la performance des participants. De ce fait, dans le mode aléatoire, les visuels peuvent aussi contribuer à la compréhension des principes de *DS/DM*. Enfin, malgré la latence reportée par les participants, qui les oblige parfois à exécuter un composant plus longtemps qu'ils ne le désirent, la présence de visuels interactifs contribue à améliorer l'expérience de *DS/DM*.

## 8.6 Discussion

Nous avons décrit dans ce chapitre, notre système interactif dans lequel des visuels basés sur des modèles physiques MSS sont affichés en réponse aux qualités de mouvement des participants. Ce système a été mis en œuvre avec succès dans l'installation interactive *DS/DM* en collaboration avec la compagnie de danse contemporaine EG|PC. Il a été d'abord testé avec quatre danseuses lors d'une première semaine de résidence au Portugal. Par la suite, nous avons mené une deuxième expérimentation avec les danseurs professionnels de la compagnie experts en *DS/DM*, qui avait pour but d'évaluer leur perception de l'interaction et de la rétroaction. Enfin, la troisième expérimentation menée avait pour but d'évaluer l'installation dans un contexte purement pédagogique. Elle a examiné l'expérience utilisateur de l'interaction et sa valeur pédagogique auprès d'étudiants en danse non experts en *DS/DM*.

Les résultats de ces tests, suggèrent que les danseurs peuvent vivre l'interaction en s'appuyant sur des comportements visuels générés par modèles physiques. Ces comportements sont perçus comme reflétant les qualités des danseurs. Les danseurs considèrent les visuels comme un outil réflexif qui les encourage à exécuter les composants, améliore leur expérience et contribue à leur compréhension corporalisée de *DS/DM*.

Cependant, les résultats des trois évaluations précédentes révèlent l'impact du degré d'expertise sur l'expérience de l'interaction dans des systèmes tels que *DS/DM*. Il est difficile pour des non experts en danse n'étant pas en mesure d'exécuter les qualités de mouvement requises, d'expérimenter la relation avec les visuels. En revanche, pour des utilisateurs ayant une grande expertise tels que les danseurs d'EG|PC, les visuels réflexifs de *DS/DM* ne présentent pas un grand intérêt pédagogique puisque les danseurs ont déjà une connaissance approfondie du vocabulaire cible (les qualités de mouvement). Pour pallier ces limitations liées à une relation réflexive, une solution possible est de concevoir des systèmes avec différents niveaux d'expertise (approche illustrée dans les jeux vidéo). Une autre solution est de concevoir des systèmes adaptatifs où l'interaction s'adapte automatiquement en fonction de l'expertise de l'utilisateur. Cette dernière solution reste une problématique de recherche ouverte et une perspective intéressante de notre travail.

En outre, il apparaît que le type de relation avec des visuels par MSS qui intéresse les danseurs professionnels, est une relation de « duo » (plutôt qu'une relation réflexive). Ce type de relation est adapté à un contexte de production ou de performance plutôt qu'à un contexte pédagogique. Elle requiert tout de même un processus d'apprentissage, non pas du vocabulaire gestuel, mais des possibilités de contrôle offertes par l'outil numérique. Cette relation de duo avec des visuels par MSS sera explorée dans l'annexe A de ce manuscrit, dans un cadre de performance, en collaboration avec la danseuse principale du Ballet National de Marseille.

Enfin, pour ouvrir de nouvelles perspectives, les expérimentations conduites ont montré que notre système faisait partie d'une nouvelle génération d'approches de la pédagogie de la danse où les nouveaux médias améliorent le processus d'apprentissage des danseurs. Pour cette raison, l'installation *DS/DM* a été bien accueillie par les professionnels de la pédagogie de la danse. Concrètement, elle est actuellement utilisée comme outil pédagogique dans le département de danse de l'École d'Art d'Amsterdam.



**Troisième partie**

**Conclusion**





## Chapitre 9

# Contributions et Perspectives

### 9.1 Rappel des contributions de la thèse

Le but général de notre thèse était d'étudier la notion de qualités de mouvement issue de la danse dans les IHM basées sur le geste. La figure 9.1 présente l'ensemble des contributions de notre travail de thèse. Nous en décrivons ci-dessous les différents éléments.

Tout d'abord, nous avons dressé un état des lieux dans le chapitre 2 des travaux où la performance et en particulier la danse est en lien avec les technologies numériques. Ce chapitre a proposé ensuite une vue d'ensemble sur la troisième vague en IHM et les différents types d'interactions qui la composent, notamment, l'interaction gestuelle, corporalisée, ou l'interaction du corps entier. Nous avons présenté dans le chapitre 3, une collection de définitions de la notion de qualité de mouvement et des concepts associés. Etant donné qu'il n'existe pas de formalisation unique des qualités de mouvement, et afin de nous placer dans un cadre expérimental bien défini, nous avons présenté la formalisation de la compagnie de danse contemporaine EG|PC des qualités de mouvement issues de leur atelier *DS/DM*. Nous nous sommes basée sur cette formalisation pour la conception et le développement de nos dispositifs interactifs. Notre travail promeut l'utilisation de telles caractéristiques expressives du geste afin d'augmenter les capacités d'interaction par les mouvements du corps.

Sur le plan expérimental, nous avons conçu l'installation *A Light Touch*, décrite dans le chapitre 6, afin de vérifier que les qualités de mouvement contribuent à créer une interaction riche et intrigante. Les qualités de mouvement fournissent de grandes possibilités d'expression mais semblent plus difficiles à apprendre et à exécuter que les mouvements requis dans des interactions basées sur des relations « directes ». Cette difficulté est cependant récompensée par les nouvelles possibilités expressives du geste ainsi offertes.

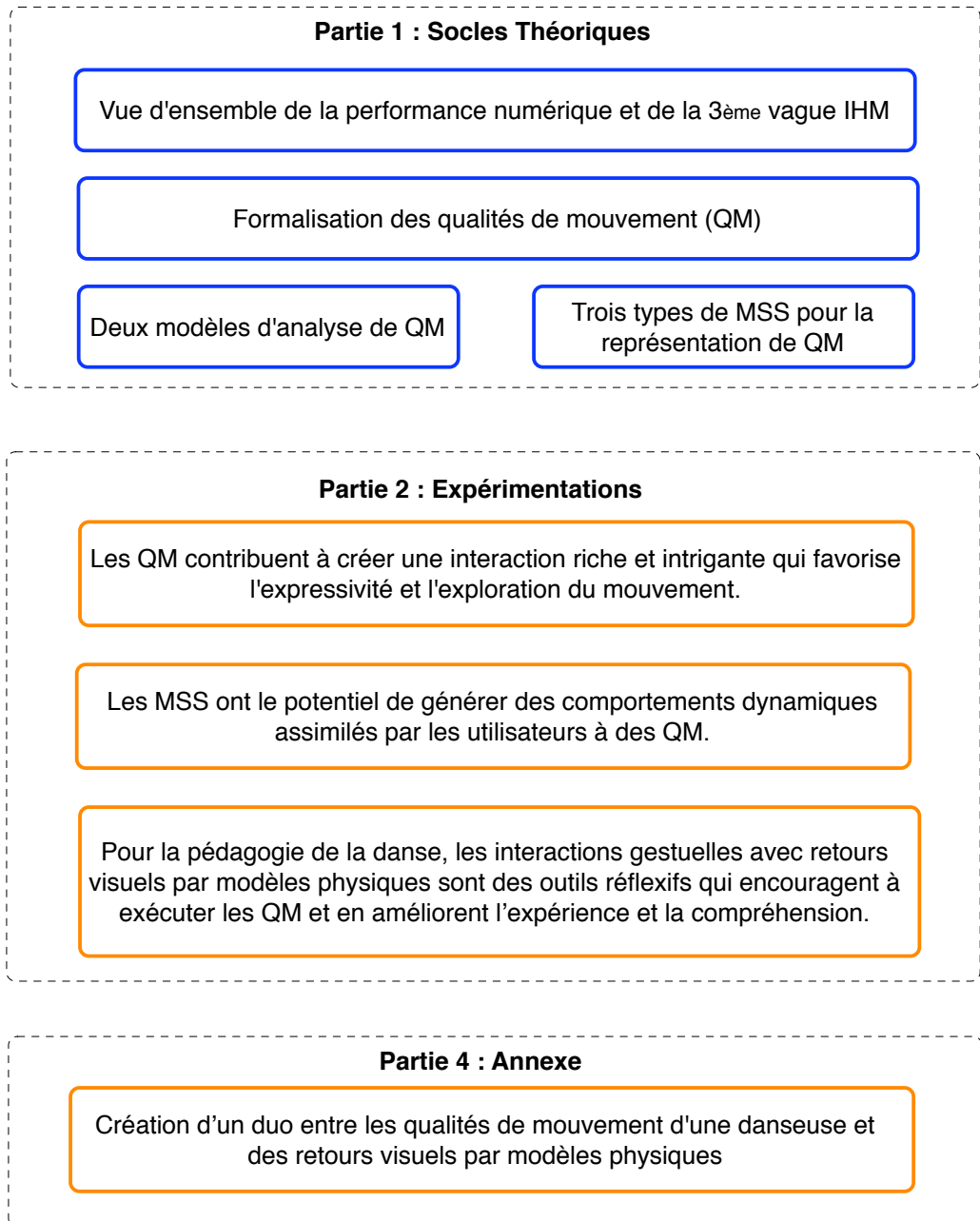
**Analyse du Geste Dansé et Retours Visuels par Modèles Physiques:  
Apport des Qualités de Mouvement à l'Interaction**

FIGURE 9.1 – Contributions de la thèse.

Par le biais d'une expérimentation en ligne, nous avons montré dans le chapitre 7 que les modèles physiques masses-ressorts ont le potentiel de simuler des comportements dynamiques assimilés par les utilisateurs à des qualités de mouvement dansé. Nous sommes partie de cette similarité perceptive (que nous désignons dans le manuscrit par « physico-réaliste ») entre les comportements dynamiques des modèles physiques et les qualités de mouvement, et avons élaboré des méthodes d'analyse et de visualisation de qualités de mouvement. Ainsi, nous avons développé des visuels basés sur des modèles masses-ressorts qui peuvent dans un contexte interactif, soit refléter, soit être en duo avec les qualités de mouvement du danseur.

Afin d'explorer les capacités représentatives et expressives des systèmes masses-ressorts, nous avons proposé plusieurs modèles dans le chapitre 5, d'échelles fines ou massives et de topologies différentes. Concernant l'analyse des qualités de mouvement, nous avons modélisé leurs dynamiques sous-jacentes par le biais de ces mêmes modèles physiques. Pour reconnaître les qualités d'un mouvement en entrée, nous avons utilisé des méthodes de reconnaissance qui reposent sur une identification en temps réel des paramètres du modèle physique qui caractérisent le mieux les données gestuelles. En parallèle, nous avons aussi élaboré une méthode de reconnaissance reposant sur des descripteurs de qualités de mouvement combinés avec un algorithme de reconnaissance automatique basé sur des modèles de Markov cachés. L'ensemble de nos contributions formelles de reconnaissance de qualités de mouvement est décrit dans le chapitre 4.

Enfin, notre travail a considéré l'utilisation des systèmes masses-ressorts pour l'analyse des dynamiques gestuelles et pour la représentation conjointe de ces dynamiques. Cette utilisation parallèle du même modèle en entrée et en sortie du système interactif permet d'alléger la couche de contrôle et de trouver un lien direct entre les dynamiques du geste et les comportements dynamiques du retour visuel.

A partir de ces contributions formelles, nous avons mis en œuvre un ensemble de dispositifs interactifs pendant la thèse. Le premier dispositif décrit dans le chapitre 6, est l'installation interactive *A Light Touch* où les participants contrôlent à travers trois dynamiques (oscillatoire, oscillatoire amortie et amortie non oscillatoire) du mouvement de leur main, des comportements d'une lumière horizontale.

Le deuxième dispositif décrit dans le chapitre 8, est l'installation pédagogique *DS/DM* qui a été développée et expérimentée en collaboration avec la compagnie de danse contemporaine EG|PC. Elle fait désormais partie des moyens pédagogiques de cette compagnie et permet à des étudiants en danse d'apprendre, d'expérimenter, de s'entraîner au vocabulaire de la compagnie en interagissant avec des visuels basés sur des MSS d'échelle

fine qui répondent à leurs qualités de mouvement. Nous avons évalué les capacités interactives et pédagogiques de ce dispositif au moyen de trois différentes expérimentations décrites dans le chapitre 8. Les résultats de l'ensemble des expériences suggèrent que les danseurs peuvent augmenter et contrôler leurs interactions avec des comportements visuels générés par modèles masses-ressorts. Les danseurs perçoivent clairement que ces comportements reflètent leurs qualités de mouvement. De plus, ils considèrent les visuels comme un outil réflexif qui les encourage à exécuter leurs gestes avec les qualités de mouvement requises, qui améliore leur expérience de l'installation et qui contribue à une expérience corporalisée du vocabulaire gestuel de *DS/DM*.

Le troisième dispositif décrit dans l'annexe A est la performance de danse augmentée *Chisseling Bodies* que nous avons développée en collaboration avec la danseuse principale du Ballet National de Marseille, Marion Cavallé. Dans ce contexte de performance, nous avons mis en œuvre, grâce à des méthodes de conception participative, un duo entre les qualités de mouvement de la danseuse et les comportements d'un visuel interactif basé sur un modèles masses-ressorts d'échelle massive. Alors que les applications précédentes avec la compagnie EG|PC étaient à visée pédagogique, le travail avec Marion Cavallé est orienté vers l'augmentation de la performance tant pour l'improvisation que pour la scénographie numérique. L'annexe décrit les observations ainsi que les entretiens que nous avons conduits avec la danseuse afin de recueillir ses opinions concernant ce dispositif interactif.

## 9.2 Perspectives

De notre travail de thèse, nous pouvons dégager plusieurs perspectives de recherche. Parmi les perspectives d'applications directes figure, toujours dans le contexte de la danse, l'utilisation de nos modèles de reconnaissance et de visualisation de qualités de mouvement dans la notation du geste dansé en vue d'en transmettre le contenu expressif.

Une autre perspective directe de notre analyse des qualités de mouvement est l'étude de leur potentiel à révéler formellement des états émotionnels de l'individu. Cette perspective serait à poursuivre dans le domaine de *affective computing*, de la psychologie ou de la réalité virtuelle, en particulier pour la synthèse de gestes expressifs pour les humains virtuels. La modélisation physique des qualités de mouvement pourrait être appliquée à la synthèse du mouvement et offrir ainsi des rendus visuels non abstraits différents de ceux que nous avons développés dans cette thèse. Nous pensons que cela permettrait aux humains virtuels d'être plus crédibles et acceptés par les utilisateurs.

Notre approche de représentation par modélisation physique de qualités de mouvement peut être adaptée à l'animation de personnages articulés. Cela requiert une prise en compte des contraintes relatives aux liaisons entre les différentes parties du corps. Pour ce faire, il convient de redéfinir des modèles physiques qui soient mieux adaptés à ces contraintes. Ces modèles peuvent provenir par exemple des lois invariantes du contrôle moteur. Ils peuvent aussi être déterminés à partir de méthodes cinématiques et/ou dynamiques inverses qui ont en général pour but de déterminer les paramètres physiques du modèle en fonction de la dynamique désirée et des contraintes appliquées.

Enfin, il serait intéressant d'élargir la palette des qualités de mouvement étudiées au-delà de celles de la compagnie EG|PC et même au delà de celles issues la danse. Ces qualités de mouvement pourraient alors être intégrées comme modalité d'entrée de l'interaction dans différents contextes d'application. Par exemple, elles pourraient être adaptées aux interfaces personnelles portables ou ubiquitaires ainsi qu'aux interfaces publiques. Il conviendrait alors d'étudier si elles contribuent à améliorer le quotidien de l'utilisateur. Elles pourraient aussi être utilisées dans des dispositifs interactifs appliqués au domaine médical, par exemple pour la réhabilitation ou le diagnostic, à l'Internet des objets, aux jeux vidéo, ou aux jeux sérieux (ang. *serious games*).

### 9.3 Post-scriptum

Ma thèse était ancrée dans le paysage Arts-Sciences puisqu'elle a mis à profit des connaissances du geste issues de ma propre pratique de la danse classique et contemporaine et issues de théories existantes du geste dansé, et ce afin d'étudier les qualités de mouvement dans des paradigmes d'interaction gestuelle.

La danse a ainsi joué un rôle central dans ma thèse puisqu'elle a non seulement inspiré les études élaborées et les dispositifs développés, mais elle a aussi constitué un terrain d'application à la fois riche et complexe.

Comme l'a si bien dit la chorégraphe Martha Graham :

« *Dance is the hidden language of the soul !* »



## **Quatrième partie**

### **Annexes**





## Annexe A

# Conception et Expérimentation de l'Interaction avec les Modèles Masses-Ressorts Massifs pour la Danse Augmentée

### A.1 Hypothèse et question de recherche

Dans cette expérimentation la question de recherche développée est : « Dans quelle mesure les dispositifs interactifs basés sur les qualités de mouvement peuvent-ils être utilisés comme outil d'expression artistique pour la performance augmentée ? ».

Pour tenter de répondre à cela nous avons conçu un système interactif avec un rendu visuel par modèles physiques contrôlés par les paramètres de qualité de mouvement de la danseuse qui offre un environnement propice à une boucle de rétroaction perceptive pour l'improvisation. Ce choix est motivé par la volonté de créer un duo entre la danseuse et des retours visuels pour la création et le spectacle dans la cadre de la performance augmentée *Chisseling Bodies*. Nous avons conçu un système interactif qui prend en entrée les descripteurs caractérisant des qualités de mouvement et les utilise pour produire en sortie un rendu visuel à base de modèles physiques masses-ressorts (MSS) d'échelle massive.

### A.2 Méthodologie de conception participative

Pour développer la visualisation et le contrôle des MSS massifs utilisés dans la performance collaborative *Chisseling Bodies*, nous avons suivi une

méthodologie de conception participative. Nous avons utilisé ce type de méthode car cette expérience résulte d'une rencontre entre moi-même et Marion Cavailé, soliste au Ballet Nationale de Marseille et d'une envie de créer une collaboration où je participais au processus créatif autant que Marion Cavailé participait à la conception scientifique. De plus, impliquer la danseuse/chorégraphe dans la phase de conception et d'évaluation permettait de :

1. obtenir une interaction et un dialogue intéressant du point de vue scientifique et artistique entre la danse et la technologie ;
2. mieux fusionner la technologie avec la chorégraphie dans une perspective artistique ;
3. explorer les limitations de la technologie, et l'utiliser de façon créative ;
4. apporter des idées, des métaphores, des inspirations qui enrichissent l'interaction ;
5. mettre en place des scénarios d'interaction davantage centrés sur la danseuse ;
6. permettre à la danseuse/chorégraphe d'acquérir une expertise plus grande et une compréhension plus approfondie du système.

### **Méthodologie**

Nous avons suivi la méthodologie de Spinuzzi (2005) qui consiste à itérer autant que nécessaire les trois étapes principales et l'avons combinée avec des outils supplémentaires de design participatif (Coughlan et Johnson, 2009).

1. L'exploration initiale du travail : étape où le développeur-chercheur et le participant se familiarisent avec la technologie, les outils et les méthodes de travail. Nous avons effectué un ensemble de définitions initiales des outils, méthodes, programmes que nous pouvions utiliser pour créer les MSS de *Chisseling Bodies*.
2. Le processus de découverte : étape permettant de définir par exemple le cahier des charges afin de clarifier les objectifs et les valeurs et se mettre d'accord sur les résultats escomptés.
  - (a) Nous avons produit et esquissé des idées (suivant les concepts de *productive interaction* de Coughlan).
  - (b) En se basant sur ces idées, nous avons construit des scénarios d'interaction.
3. Le prototypage : étape où le développeur et le participant donnent forme à la technologie de manière itérative pour qu'elle corresponde aux objectifs déterminés à l'étape 2. A cet égard, nous avons :

- (a) produit des prototypes de l'interaction,
- (b) testé les prototypes,
- (c) rapporté des observations sur l'étape de test des prototypes,
- (d) effectué des entrevues à l'issue du test de chaque prototype.

La décision d'arrêter les itérations de ce processus participatif devait correspondre à une satisfaction commune de la scientifique et de la danseuse quant au MSS résultant. Ainsi, en trois cycles de conception, à la fin des entrevues et de l'observation de l'utilisation du prototype résultant, nous avons considéré que les visuels avaient clairement répondu au « cahier des charges » défini à l'étape 2 du design participatif. Les visuels étaient expressifs, et permettaient une relation intéressante avec la danse. En somme, nous avons alors considéré qu'il n'y avait plus besoin d'apporter des améliorations supplémentaires aux MSS massifs développés.

### A.2.1 Phase d'exploration initiale

Lors des sessions initiales, il s'agissait de définir avec Marion Cavallé ce dont nous disposions.

1. D'un point de vue vocabulaire gestuel, Marion et moi-même avons échangé des idées pendant des sessions de *brain-storming* afin de définir un ensemble de gestes et de qualités de mouvement issus de son vocabulaire propre, que nous pouvions exploiter dans la conception de l'interaction.
2. Concernant les moyens de captation, nous disposions de deux accéléromètres permettant de capter les accélérations des extrémités du corps en plus d'une caméra Microsoft Kinect permettant de capter la silhouette entière.
3. D'un point de vue computationnel, il était tout à fait possible d'utiliser un ensemble de paramètres gestuels pour construire une relation entre les visuels et la danse. Ainsi, il était possible de calculer l'énergie ou la quantité de mouvement ainsi que les « kicks » (gestes d'impact) de certaines extrémités auxquelles un accéléromètre serait attaché. Il était aussi possible de calculer l'angle d'inclinaison du corps entier ou l'extension corporelle.
4. Nous disposions d'un modèle physique et un programme de visualisation par modèle physique que nous pouvions adapter en fonction du projet et de la collaboration avec la danseuse. Nous pouvions définir des topologies très différentes en fonction du rendu désiré.
5. Nous pouvions définir un ensemble de règles qui constitueraient les mappings entre le rendu visuel par MSS et le geste de Marion afin de créer une relation de « duo » sur scène.

### A.2.2 Première itération de la phase de découverte

Certaines idées ont été esquissées lors du processus de découverte :

1. Habiller des particules en lumière.
2. Construire l'interaction de sorte qu'elle ne soit pas complètement lisible par le spectateur, car il est important que la technologie garde un aspect « magique ».
3. Travailler sur les différences rythmiques et les retranscrire dans les visuels.
4. Faire contraster le corps réel (de la danseuse) avec un concept de « corps virtuel abstrait en mouvement ».
5. Il est important de concevoir la pièce avec des moments de solo de la danseuse (sans visuels ou avec des visuels immobiles) tout en gardant à l'esprit la continuité de l'interaction au moment où les visuels doivent reprendre le « fil » de la pièce et le duo avec la danseuse.
6. L'interaction doit être « magique » mais lisible. Il faut que le spectateur n'entrevoie « qu'un huitième de l'iceberg ».
7. Il ne faut pas que la pièce consiste en une présentation du système interactif. L'oeuvre qui découle, entre autres, de l'utilisation de la technologie, doit avoir un contenu artistique fort.
8. Créer un duo danseuse-dispositif.

### A.2.3 Première itération de la phase de prototypage

Afin de créer un duo danseuse-visuels, nous avons élaboré, en collaboration avec Marion Cavaillé, des visuels abstraits interactifs basés sur des modèles physiques massifs dont les comportements créent un duo avec des gestes dansés. Les visuels sont des masses et des ressorts d'échelle massive, c'est-à-dire contenant un grand nombre de masses (jusqu'à 250 000) liées à un grand nombre de ressorts (jusqu'à 250 000).

#### a) Captation du mouvement

Pour cette performance nous avons utilisé des capteurs tels que des accéléromètres ou des gyroscopes attachés à la main droite et au pied gauche de la danseuse. Ils donnent des informations gestuelles locales sur l'accélération ou les rotations d'une articulation mais ne peuvent informer de la position absolue de ces parties du corps dans l'espace. C'est pour cette raison que nous avons combiné ces capteurs avec un capteur 3D infra-rouge de type Microsoft-Kinect. Nous utilisons le programme de traitement des données issues de la Kinect appelé Open-NI, afin d'obtenir, à partir du squelette reconstitué en 3D, les positions des marqueurs représentant la tête, les mains,

le centre de masse et les pieds, en plus de la silhouette et de la boîte englobante de la danseuse.

### b) Paramètres du mouvement

Les paramètres de mouvement sont calculés à partir des données de captation décrites ci-dessus, et décrivent des qualités de mouvement ou des gestes de la danseuse. Ces gestes ont été formalisés par Marion Cavaillé et moi-même pendant nos ateliers de conception. Tout comme pour *DS/DM*, nous classons nos paramètres du mouvement en deux catégories : les paramètres *spatiaux* et *temporels*.

#### Descripteurs spatiaux

1. **Hauteur** : La hauteur est calculée comme la hauteur maximale atteinte par la silhouette. Une valeur basse (en dessous d'un certain seuil) indique que l'utilisateur est au sol et une valeur haute (au-dessus d'un certain seuil) indique que l'utilisateur saute.
2. **Saut et chute** : La chute est un indice qui est calculé à partir de la dérivée de la hauteur de l'utilisateur. Lorsque l'utilisateur chute, sa hauteur décroît rapidement en deçà d'un certain seuil fixé (avec une orientation de l'axe vertical vers le haut). Enfin, lorsque l'utilisateur saute, sa hauteur croît rapidement, et ainsi la dérivée de la hauteur est positive et sa valeur est supérieure à un certain seuil.

#### Descripteurs temporels

1. **Immobilité** : L'immobilité est un descripteur qui est calculé à partir de l'inverse de la quantité de mouvement. La quantité de mouvement est la variation dans le temps de l'intensité en pixels de la silhouette du participant (i.e. la surface image de la silhouette en nombre de pixels). Elle est utilisée pour définir à chaque instant le niveau d'activité de la silhouette. Ainsi, lorsque l'utilisateur ne bouge plus, sa quantité de mouvement est proche de zéro, et ainsi l'indice d'immobilité devient très important.
2. **Énergie** : L'énergie du mouvement d'une partie du corps est calculée à partir de la norme de sa vitesse. Ce descripteur est lié à l'énergie cinétique normalisée de la partie du corps étudiée. L'énergie cinétique d'un point matériel de masse  $m$  se déplaçant à une vitesse  $v$  est  $E_c = 1/2 \times m \times v^2$ .
3. **Kick** : Le kick est un geste d'impact qui est détecté lorsque l'énergie croît rapidement (dérivée très élevée) et dépasse un certain seuil fixé.

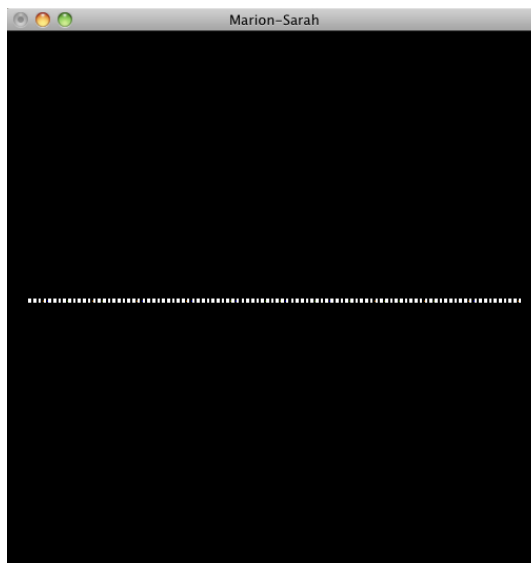


FIGURE A.1 – La première topologie en trait proposée lors de la première itération de prototypage

### c) Visualisation et contrôle des trois premiers prototypes

Lors de la première itération, nous avons prototypé, pendant les ateliers de conception conduits avec Marion Cavaillé, trois différents MSS massifs avec trois « mappings » entre le geste et les paramètres ces modèles.

La première topologie représentée dans la figure A.1 est une corde rectiligne composée de 100 masses alignées où chaque masse est liée par un ressort à ses deux voisines directes. Notre idée était de représenter une métaphore de corde accrochée à la danseuse. Pour cela nous avons associé la hauteur de la première masse de l'extrémité gauche de la corde à la hauteur de la danseuse. Pour que l'énergie du mouvement se répercute sur l'énergie du modèle, nous avons associé la raideur de l'ensemble des ressorts à l'énergie de la main de la danseuse et la viscosité de l'environnement à l'immobilité de la danseuse.

La deuxième topologie représentée dans la figure A.2 est une nuée composée de 250 000 masses où chaque masse est liée par un ressort à ses deux voisines directes formant une topologie en cercle. La distance initiale des masses au centre est aléatoire et les rayons sur lesquels elles sont disposées sont répartis isodirectionnellement. Notre idée est de refléter l'inclinaison du corps de la danseuse en faisant tourner le modèle en conséquence. Pour ce faire, nous avons associé l'angle du corps de la danseuse à une force de rotation appliquée aux masses. Pour que le modèle suive les chutes ou les sauts de Marion, nous avons associé ce descripteur à une force d'attraction

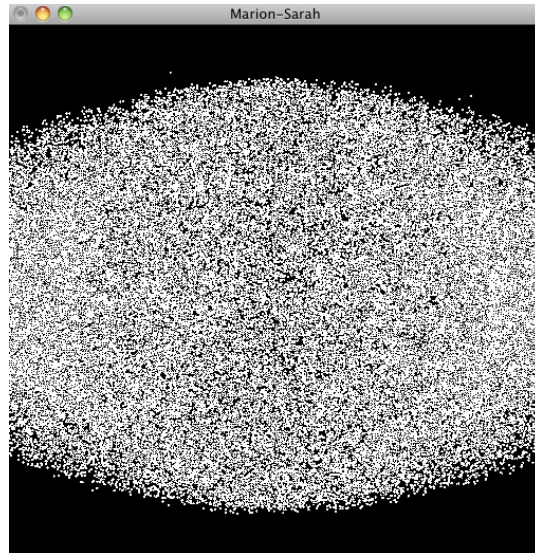


FIGURE A.2 – La deuxième topologie en nuée proposée lors de la première itération de prototypage

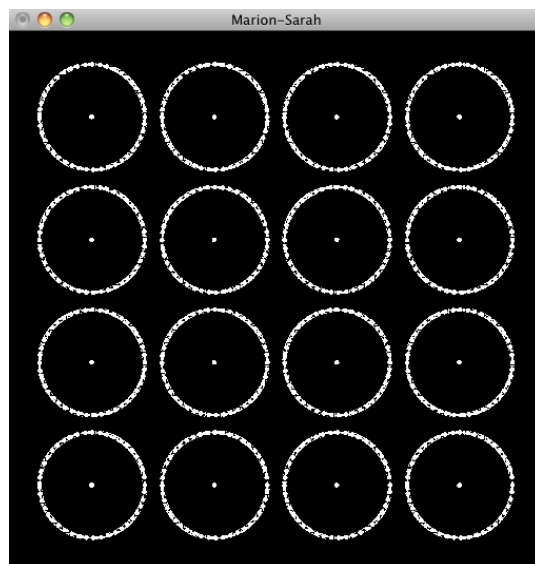


FIGURE A.3 – La troisième topologie hiérarchique proposée lors de la première itération de prototypage



agissant sur les masses. De plus, l'extension du corps de la danseuse est associée aux élongations des ressorts afin que le modèle s'étende à l'image du geste de la danseuse. Enfin, la viscosité de l'environnement est inversement proportionnelle à l'énergie de la danseuse.

La troisième topologie proposée représentée dans la figure A.3 est une topologie hiérarchique où chacune des 16 masses du modèle de contrôle est liée par des ressorts à 1000 masses d'un modèle esclave disposées en cercle autour d'elle. Il n'y a pas de masses fantômes invisibles permettant de stabiliser les masses du modèle de contrôle. Le mapping consiste à associer la vitesse de la danseuse à l'inverse de la viscosité de l'environnement et la fréquence du geste de la danseuse à la raideur des ressorts de petite échelle. L'idée ici est de reproduire les oscillations du mouvement dans le comportement du modèle.

#### **A.2.4 Première itération de la phase de test**

##### **a) Interview de Marion Cavallé à la suite du test de la première topologie en trait :**

MC : Dans cette performance, il va y avoir une création assez fixe au final. On pourra retravailler à partir de cet outil et dire : « Tiens, regarde, quand tu fais ce passage là, ce graphique là rend ça, et ça c'est pertinent ». Il faudra trouver la pertinence dans le dessin créé sur l'écran. Mais c'est maintenant que je connais les paramètres, que je vais pouvoir écrire le geste. Mais il ne faut pas trop construire pour pouvoir après, adapter et ne pas me déconnecter de ton univers.

SFA : Quelle est la relation avec le visuel ?

MC : J'ai plus l'impression qu'il est connecté à moi, mais je ne sais pas si c'est juste. C'est moi qui l'anime. Je fais des choses en fonction de comment il réagit. Quand on a ce genre d'artéfact sur scène, ce n'est pas le même rythme qu'en danse. On ne peut pas faire du mouvement perpétuellement, car on doit faire une proposition et puis ça réagit. Parce qu'on a parfois besoin d'être dans un état mort, de force zéro. Or ça se ne passe pas souvent comme cela dans les spectacles de danse traditionnels.

SFA : Oui il n'y a pas beaucoup de silences corporels

MC : Oui et c'est d'autant plus un défi qu'il y a beaucoup d'attention, car il faut captiver un peu le spectateur.

##### **b) Observations de Marion testant la deuxième topologie en nuée :**

Marion teste d'abord le prototype en termes de relation entre les coordonnées de son centre de masse et les forces d'attraction. Elle se met au sol,

constate que le modèle est attiré par le bas, se lève doucement et constate que le modèle est trop réactif, et la suit trop rapidement. Cela rend la relation plus « floue ». Effectivement, il semble difficile de contrôler le modèle car c'est une structure complexe avec un grand nombre de masses et de ressorts avec une topologie non hiérarchique. Il semble très difficile de prévoir la dynamique des 250 000 masses et de comprendre la relation qui s'établit indirectement entre leur position ou leur dynamique et celle de la danseuse. L'association entre son énergie et l'énergie du modèle n'est pas clairement perçue. Elle se déplace à droite puis à gauche et le modèle rétrécit. L'association semble difficile à percevoir pour Marion, elle a des hésitations et des arrêts qui révèlent qu'elle n'a pas compris la réaction du modèle. Le modèle se révèle instable : quelques masses divergent.

Je teste le modèle en faisant varier l'angle de mon corps, cela fait diverger les particules. Ce qui amène à changer dans le prototype l'échelle de l'association entre l'angle capté et la force de rotation appliquée sur les masses. En re-testant le modèle, la rotation paraît être mieux corrélée avec l'angle du corps. La danseuse approuve : *ah là c'est mieux, voilà, ça marche mieux.*

**c) Interview de Marion Cavallé à la suite du test de la deuxième topologie en nuée :**

SFA : Du point de vue de l'intérêt de l'interaction, comment trouves-tu le visuel ?

MC : Il n'est pas mal mais il faut que je joue avec. La deuxième étape c'est de pouvoir alterner avec des arrêts et voir quel effet cela fait. Je ne sais pas si tu as remarqué, mais au début j'étais dans la rotation, l'objet a fait des mouvements en rotation et après j'étais plus dans l'inclinaison, et là il n'a pas réagi pas de la même façon pour la rotation et l'inclinaison. Et ça c'est très bien.

**d) Observations de Marion testant la troisième topologie hiérarchique :**

En testant la première version du modèle Marion a déclaré qu'il était *dur à manipuler*. Je lui ai suggéré d'effectuer des battements du pied car cela pouvait permettre de relancer le modèle lorsqu'il est trop statique.

Comme la relation ne semblait pas être fructueuse, j'ai proposé de re-paramétrer le modèle pour rajouter de la flexibilité afin d'obtenir des ressorts moins rigides globalement.

Par la suite Marion s'est mise à explorer d'abord l'immobilité mais le modèle rapetisse tout seul. Elle a marché, mais l'impact de sa marche n'était pas nécessairement lisible car le modèle continuait à rétrécir. Elle a alterné la mobilité et le mouvement mais le modèle ne réagissait pas assez clairement aux rythmes de Marion. J'ai alors re-modifié le mapping de manière à diminuer globalement la viscosité et dynamiser le modèle. Mais le modèle

divergeait assez rapidement. Marion a alors demandé « *que s'est-il passé ?* ». Je lui ai alors expliqué que la trop grande rigidité due à une élasticité trop importante déstabilisait le modèle. Je me suis proposée de baisser l'échelle des raideurs des ressorts. Par la suite, Marion a re-testé le modèle, les alternances de rythme semblaient mieux reflétées dans le comportement du modèle de même que l'énergie de la danseuse. Elle a continué à danser avec le visuel pendant environs 15 minutes.

**e) Interview de Marion Cavaillé à la suite du test de la troisième topologie hiérarchique :**

SFA : Tu en as pensé quoi ?

MC : Génial !

SFA : Peux-tu m'expliquer pourquoi ?

MC : Parce qu'il dessine dans l'espace, il réagit lorsque je tourne. Lorsque je fais des battements, il en fait d'autres. A chaque fois que je fais un geste nouveau, il réagit différemment. Mais peut être que ça fait un peu trop effet miroir. Mais puisqu'il y a un temps de latence, il peut-être intéressant de dessiner quelque chose avec ça.

SFA : Mais ça dessine toujours des ronds plus ou moins, non ?

MC : Oui mais des fois ça fait des [signe de la main désignant des étirements de ligne en horizontal] et puis ça fait [signe de la main désignant un éclatement]. A un moment donné j'ai dessiné un tour, ça a réagit, je sais pas, je le voyais bien. C'est assez amusant. Puis j'aime bien la visualisation en points, c'est assez abstrait. Tu sais ça peut représenter un décor qui ne peut avoir aucun lien avec la danse. Puis finalement, on s'aperçoit qu'il y a un lien. Quand le spectateur va s'en apercevoir, ça sera génial !

SFA : Penses-tu que le rendu graphique est un accompagnement ou une augmentation ? Quelle est la valeur de ce qu'on voit en plus de la danse ?

MC : Je ne sais pas, je n'ai pas trouvé les mots mais ça fait une œuvre dans sa globalité.

SFA : Ça a du sens ?

MC : Ça a du sens mais dans sa globalité. Ça fait de l'effet. Je ne sais pas comment l'expliquer.

SFA : Ca suscite la curiosité ?

MC : Pour un spectacle tu te dis, « ah tiens le titre est intéressant, le sujet est intéressant ». Mais à un moment donné, c'est bien de recevoir quelque chose qui va te faire de l'effet et une semaine après, il y a quelque chose qui est resté. Là on dirait qu'on est en 3D, c'est très spatial, tu vois la rotation, ça prend l'espace, ça donne un effet, avec quelqu'un qui danse au milieu qui joue avec l'espace réel. Il y a donc un jeu avec l'espace virtuel et l'espace réel. Et c'est assez épuré.

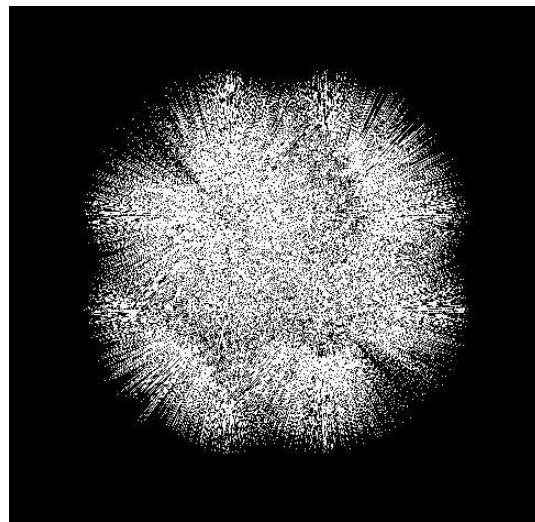


FIGURE A.4 – La dernière topologie hiérarchique proposée lors des deux dernières itérations de prototypage

SFA : Ça c'est notre esthétique aussi, car on a choisi de travailler avec des points ou avec des traits. C'est pour ne pas encombrer la scène et travailler juste avec la dynamique du mouvement.

MC : Je trouve ça assez rare, de voir un effet comme ça en 3D, c'est assez chouette !

SFA : Il faudrait garder uniquement ce modèle hiérarchique, se concentrer dessus et résoudre les problèmes d'instabilité, qu'en penses-tu ?

MC : Je suis tout à fait d'accord !

### A.2.5 Deuxième itération de la phase de prototypage

Suite à la première itération, nous avons décidé de travailler uniquement avec un modèle hiérarchique comme la troisième topologie proposée. Nous avons simplifié le modèle de contrôle qui est passé de 16 masses à 4 masses. Nous avons résolu les problèmes de divergence du modèle grâce à un sous-échantillonnage supplémentaire du schéma d'intégration de Verlet (voir section 5 pour plus de détails). Nous avons aussi modifié l'habillage de manière à visualiser les ressorts plutôt que les masses. Enfin, nous avons rajouté des masses fantômes à petite échelle de manière à pouvoir ramener, si besoin, les masses de petite échelle en position initiale à n'importe quel moment.

Le MSS massif résultant est illustré dans la figure A.4 et est décrit en détail dans la section 5.5.2 de ce manuscrit. Les stratégies de contrôle associant les paramètres gestuels de la danseuse et les paramètres des forces des MSS qui

sont élaborées pour la performance, sont décrites dans la section 5.6.2.

A la suite du prototypage effectué, la danseuse a expérimenté le même modèle pendant une semaine de répétition. Deux itérations ont amené à raffiner et à finaliser le contrôle gestuel. Nous retraçons ci-dessous les principaux points soulevés pendant ces deux itérations.

## A.2.6 Deuxième itération de la phase de test

### a) Interview de Marion à la suite de l'utilisation du prototype

SFA : Est-ce que les visuels répondent ou dialoguent avec ton mouvement ?

MC : C'est un costume, une interface. Lorsqu'il est projeté sur le corps, le corps devient un écran.

SFA : Comment peux-tu décrire la relation entre ta performance et les visuels ?

MC : Il y a une phase où tu agis sur le système, le système agit comme un corps esthétique. C'est un duo. Il définit le fait de fondre le geste-réalité avec le geste-virtualité. Il permet de sublimer, il est explosif et rythme un peu plus la chorégraphie.

SFA : Est-ce que le visuel est expressif ? Qu'apporte le visuel par rapport à la danse ?

MC : Il retranscrit en décalé une certaine énergie. On peut s'en servir pour créer de nouveaux gestes.

SFA : Quelle influence exerce le visuel sur ta performance ? L'interface te fait-elle explorer de nouveaux mouvements ? Quelles sont les contraintes exercées par l'interaction sur ta performance ?

MC : Le prototype actuel de l'interaction te demande d'être assez statique et minimise le champ gestuel, on est obligé d'effectuer des gestes minimalistes.

SFA : Quelles améliorations sont selon toi nécessaires à apporter à l'interaction ?

MC : Travailler davantage sur différentes qualités de mouvement, et axer la captation aussi sur le haut du corps, et minimiser les contraintes au niveau de l'espace. Il faut plus jouer sur les rythmiques différentes, sur les nuances de qualités de mouvement, sans que le duo devienne caricatural et trop pédagogique. Il faut garder un état tonique aussi.

SFA : Que symbolise le visuel ? Est-ce que le visuel te suggère des métaphores ? Quelles images te viennent à l'esprit en observant le visuel ?

MC : C'est un tatouage, un maquillage sur la peau, comme un masque sur le visage avec des cils. Il permet de dessiner de manière différente dans l'espace. C'est un habillage, un masque et un costume vivant, une magie.

Action/Geste	Feedback attendu
Kick du pied	Excitation des masses de petite échelle de la topologie hiérarchique du modèle physique
Chute ou saut	Déplacement du graphique grâce à un effet de gravité
Hauteur de la danseuse	Déplacement du graphique grâce à un effet de gravité
Energie continue et lente de la main	Formes symétriques amples
Energie de la main	Ampleur du modèle physique
Alternance arrêt/mouvement	Visuels figés puis en mouvement
Transition entre les mouvements	Figement du système

TABLE A.1 – Les scénarios d’interaction de la performance augmentée

### A.2.7 Deuxième itération de la phase de découverte

A la suite de la deuxième itération du prototypage du contrôle du MSS, et dans l’objectif de clarifier les réponses attendues du MSS pour certaines actions et certains gestes de Marion, nous avons réitéré une phase de découverte en précisant un cahier des charges des scénarios d’interaction. Ces scénarios d’interaction sont définis par des associations entre des actions/gestes de la danseuse et des réactions des MSS et sont détaillés dans le tableau A.1.

### A.2.8 Troisième itération de la phase de prototypage

A la suite de la définition des scénarios d’interaction voulus, nous avons reprototypé le contrôle gestuel à partir de la précédente version. Nous avons modifié les paramètres de manière à répondre aux points d’amélioration soulevés lors de l’itération précédente afin de répondre au cahier des charges décrit dans le tableau A.1. Le prototype modifié a été testé de nouveau par la danseuse.

Nous détaillons dans les sections suivantes les observations que nous avons recueillies pendant le test du nouveau prototype. Nous reportons dans le tableau A.2.9 les descriptions de Marion des comportements visuels, à la suite de son expérimentation du dispositif. Enfin nous retranscrivons les entrevues que nous avons effectuées à la suite du test.

### A.2.9 Troisième itération de la phase de test

Marion a testé en profondeur les contrastes entre l’arrêt et le « en mouvement ». La danseuse a beaucoup expérimenté les changements d’énergie

Action/Geste	Feedback obtenu
Kick du pied	Excitation des grandes masses (se référant aux masses du modèle de contrôle)
Chute ou saut	Chute ou saut du visuel en même temps
Hauteur du corps	Élévation ou abaissement du système
Energie continue et lente	Rosace symétrique
Energie des mouvements de la main	Ampleur des visuels
Alternance arrêt mouvement	Visuels figés puis en mouvement
Transition entre les mouvements	Système figé

TABLE A.2 – Les réponses du modèle rapportées par Marion à chaque action/geste de la performance augmentée

et l'impact que cela avait sur le visuel. Elle a aussi exploré les « kicks » avec le pied qui excitaient les masses à petite échelle de la topologie hiérarchique du modèle physique. Elle a alterné entre mouvements des pieds et des mains et a aussi expérimenté la chute et le saut.

Les images regroupées dans la figure A.5 représentent des captures d'écran des vidéos enregistrées lors des interactions de Marion avec les visuels suivant les différents scénarios définis dans le tableau A.1. Dans la première photo, elle interagit avec les visuels grâce à l'énergie de sa main et produit des motifs symétriques semblables à des rosaces. Dans la deuxième photo, elle interagit avec les visuels en faisant des kicks du pied qui excitent les quatre masses du modèle de contrôle. Dans la troisième (respectivement quatrième) photo, elle interagit avec les visuels en faisant une chute (respectivement un saut) qui impliquent une chute (respectivement un saut) du visuel. Enfin, dans la dernière photo, Marion interagit avec les visuels grâce à l'énergie de sa main qui augmente l'amplitude des milliers de masses du modèle esclave.

Par ailleurs, nous avons recueilli la description de Marion des réponses du modèle à chaque action/geste de la performance augmentée. Ceci est décrit dans le tableau A.2.9.

#### a) Interview de Marion à la suite de l'utilisation du prototype

SFA : Comment vois-tu le visuel maintenant ?

MC : C'est un écho.



FIGURE A.5 – captures d'écran des vidéos enregistrées des interaction de Marion avec les visuels suivant les différents scénarios définis dans le tableau A.1

SFA : Comment peux-tu décrire cette relation d'écho ?

MC : Elle dépend du niveau d'énergie du mouvement. J'ai beau faire la même phrase, la réponse est toujours différente, c'est le principe d'être vi-



vant comme la danse.

SFA : Dirais-tu que les visuels sont expressifs ?

MC : Oui.

SFA : Qu'apporte le visuel par rapport à la danse ?

MC : Tu vois l'énergie se propager, le déplacement est retranscrit. Il y a une retranscription graphique de ce que je fais et une création d'énergie.

SFA : Quelle influence exerce le visuel sur ta performance ?

MC : C'est un duo, il est à l'écoute, c'est un partenaire de danse !

SFA : L'interface te fait explorer de nouveaux mouvements ?

MC : Je ne suis pas tout le temps dans la danse.

SFA : Ah bon ? Mais comment définis-tu la danse ?

MC : Les expériences extrêmes ne me plaisent pas, je préfère la beauté du geste, il faut certes rester tolérant mais on ne se déplace pas pour rien !

SFA : Dans ce cas-là, quelles sont ici les contraintes exercées par l'interaction sur ta performance ?

MC : Elle fait ralentir mon rythme. On doit comprendre le système, s'y adapter mais en même temps je ne veux pas être au service de la technologie, il faut laisser la place à la danse.

SFA : Quelles améliorations selon toi, sont nécessaires à apporter à l'interaction ?

MC : Je ne vois plus d'amélioration, je pense qu'il faut s'exercer à utiliser le système. A la prochaine étape il faut amener des phrases écrites. Il faut aussi mettre de la musique par-dessus. Elle permettra de créer un état tonique qui est nécessaire pour expérimenter cette interaction.

SFA : Que symbolise le visuel ? Est-ce que le visuel te suggère des métaphores ? Quelles images te viennent à l'esprit en observant le visuel ?

MC : J'ai envie de faire des tableaux, envie de fixer des tableaux grâce à mon geste, c'est beau, c'est juste de la beauté !

## Annexe B

# Liste des Publications

### Chapitre d'un ouvrage Collectif :

BEVILACQUA, F., SCHNELL, N. et FDILI ALAOUI, S. (2011). Gesture capture : Paradigms in interactive music/dance systems. *Emerging Bodies : The Performance of Worldmaking in Dance and Choreography*, page 183.

### Articles de Journaux avec comité de lecture :

FDILI ALAOUI, S., BEVILACQUA, B., BERMUDEZ, B. et JACQUEMIN, C. (2013). Dance interaction with physical model visualization based on movement qualities. *International Journal of Arts and Technology, (IJART)* (accepted).

DELPRAT, N., LEROUX, C. et FDILI ALAOUI, S. (2011). Experience of a cloud-avatar : scientific challenges and artistic perspectives. *International Journal of Design and Innovation Research (IJODIR)*, 6(1) :127–143.

### Article de Journal artistique avec comité de lecture :

BERMUDEZ, B., DELAHUNTA S., HOOGENBOOM, M., ZIEGLER, C., BEVILACQUA, F., FDILI ALAOUI, S. et MENESES GUTIERREZ, B. (2011). The double skin/double mind interactive installation. *The Journal for Artistic Research (JAR)*.

### Articles dans les *proceeding* de conférences avec comités de lecture :

FDILI ALAOUI, S., CARAMIAUX, B., SERRANO, M. et BEVILACQUA, F. (2012). Dance movement qualities as interaction modality. In *Proceedings of the Conference on Designing Interactive Systems (DIS)*, pages 761– 769. ACM.

FDILI ALAOUI, S., CARAMIAUX, B. et SERRANO, M. (2011). From dance to touch : movement qualities for interaction design. In *Proceedings of the International Conference on Human Factors in Computing Systems (SIGCHI)*, pages 1465–1470. ACM.

DELPRAT, N., LEROUX, C. et FDILI ALAOUI, S. (2011). In the clouds, virtual

experience of a matter. In RICHIR, S. et SHIRAI, A., éditeurs : In Proceedings of Virtual Reality International Conference (VRIC), Laval, France.

CARAMIAUX, B., ALAOUI, S., BOUCHARA, T., PARSEIHIAN, G., RÉBILLAT, M. et al. (2011). Gestural auditory and visual interactive platform. In Proceedings of the International Conference on Digital Audio Effects (DAFx-11), page 167–170

# Bibliographie

- ARGYLE, M. (1988). *Bodily communication*. Taylor & Francis. 34
- ARULAMPALAM, M., MASKELL, S., GORDON, N. et CLAPP, T. (2002). A tutorial on particle filters for online nonlinear/non-gaussian bayesian tracking. *IEEE Transactions on signal processing*, 50(2):174–188. 74
- BARTENIEFF, I. (1972). Dance therapy : A new profession or a rediscovery of an ancient role of the dance ? *Dance Scope*, 7(1):6–18. 46
- BARTENIEFF, I. et LEWIS, D. (1980). *Body movement : Coping with the environment*. Gordon and Breach Science, New York, USA. 46
- BEAUDOUIN-LAFON, M. (2004). Designing interaction, not interfaces. In *Proceedings of the working conference on Advanced Visual Interfaces*, pages 15–22. ACM. 23, 130
- BELLER, G. (2011). Arcane d'"un mage en été". *Théâtre Publique*, 200:100–104. 61
- BERMUDEZ, B. (2009). Capturing intention ; an interdisciplinary research project. *Danswetenschap in Nederland*, number 5. 21, 48, 49, 50, 63
- BERMUDEZ, B. et FERNANDES, C. (2010). Inventing the interactive glossary : an approach to documenting contemporary dance. *Arti journal*, 2(2):29–31. 48, 50, 63, 80
- BERMUDEZ, B., S., D., HOOGENBOOM, M., ZIEGLER, C., BEVILACQUA, F., FDILI ALAOU, S. et MENESES GUTIERREZ, B. (2011). The double skin/double mind interactive installation. *The Journal for Artistic Research (JAR)*. 63
- BERTHOZ, A. (2008). *Le sens du mouvement*. O.Jacob. 42
- BEVILACQUA, F., BASCHET, F. et LEMOUTON, S. (2012). The augmented string quartet : experiments and gesture following. *Journal of New Music Research (Accepted)*. 61
- BEVILACQUA, F., GUÉDY, F., SCHNELL, N., FLÉTY, E. et LEROY, N. (2007). Wireless sensor interface and gesture-follower for music pedagogy. In *Proceedings of the 7th international conference on New interfaces for musical expression*, pages 124–129. ACM. 78

- BEVILACQUA, F., SCHNELL, N. et FDILI ALAOUI, S. (2011a). Gesture capture : Paradigms in interactive music/dance systems. *Emerging Bodies : The Performance of Worldmaking in Dance and Choreography*, page 183. 59, 61, 84
- BEVILACQUA, F., SCHNELL, N., RASAMIMANANA, N., ZAMBORLIN, B. et GUÉDY, F. (2011b). Online gesture analysis and control of audio processing. *Musical Robots and Interactive Multimodal Systems*, pages 127–142. 78
- BEVILACQUA, F., ZAMBORLIN, B., SYPNIEWSKI, A., SCHNELL, N., GUÉDY, F. et RASAMIMANANA, N. (2010). Continuous realtime gesture following and recognition. In *Embodied Communication and Human-Computer Interaction, In Lecture Notes in Computer Science*, volume 5934, pages 73–84. Springer. 61, 66, 82
- BILLINGHURST, M. et BUXTON, B. (2009). Gesture based interaction. In *Bill Buxton, Haptic Input*, chapitre 14. Cambridge University Press. 23, 24
- BLOM, L. et CHAPLIN, L. (1982). *The intimate act of choreography*. Univ of Pittsburgh Pr. 55
- BOUCHARD, D. et BADLER, N. (2007). Semantic segmentation of motion capture using laban movement analysis. In *Intelligent Virtual Agents*, pages 37–44. Springer. 62
- BREGLER, C. (1997). Learning and recognizing human dynamics in video sequences. In *Proceeding of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, page 568. IEEE Computer Society. 78
- BRYSON, A. (1975). *Applied optimal control : Optimization, Estimation and Control*. Taylor & Francis. 38
- BUXTON, W. (1986). There is more to interaction than meets the eye : Some issues in manual input. In *User Centered System Design : New Perspectives on Human-Computer Interaction.*, pages 319–337. Lawrence Erlbaum Associates. 24
- CABRAL, D., CARVALHO, U., SILVA, J., VALENTE, J., FERNANDES, C. et CORREIA, N. (2011). Multimodal video annotation for contemporary dance creation. In *Proceedings of the 2011 annual conference extended abstracts on Human factors in computing systems*, pages 2293–2298. ACM. 17
- CADOZ, C. (1994). Le geste canal de communication homme/machine : la communication «instrumentale». *TSI. Technique et science informatiques*, 13(1):31–61. 35
- CADOZ, C. (1999). Musique, geste, technologie. In *Les nouveaux gestes de la musique*, pages 47–92. Editions Parenthèse. 89
- CAGE, J. (2011). *Silence : lectures and writings*. Wesleyan. 27
- CAMURRI, A., HASHIMOTO, S., RICCHETTI, M., RICCI, A., SUZUKI, K., TROCCA, R. et VOLPE, G. (2000). Eyesweb : Toward gesture and affect recognition in interactive dance and music systems. *Computer Music Journal*, volume 24(1): pages 57–69. 16, 60, 62

- CANDY, L. et EDMONDS, E. (1997). Supporting the creative user : a criteria-based approach to interaction design. *Design Studies*, 18(2):185–194. 29
- CARAMIAUX, B. (2011). *Etude sur la relation Geste-son en performance musicale*. Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie et Ircam. 74
- CARAMIAUX, B., ALAOU, S., BOUCHARA, T., PARSEIHIAN, G., RÉBILLAT, M. et al. (2011). Gestural auditory and visual interactive platform. In *Proceedings of the International Conference on Digital Audio Effects (DAFx-11)*, pages 167–170. Ircam. 90
- CHI, D., COSTA, M., ZHAO, L. et BADLER, N. (2000). The emote model for effort and shape. In *Proceedings of the Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques (SIGGRAPH)*, pages 173–182. ACM. 38, 62
- CLAY, A., COUTURE, N., NIGAY, L. et al. (2009). Towards emotion recognition in interactive systems : Application to a ballet dance show. In *WinVR'09, Proceeding of the World Conference on Innovative Virtual Reality*, pages 19–24. 62
- COMANICIU, D., RAMESH, V. et MEER, P. (2003). Kernel-based object tracking. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 25(5):564–577. 74
- CONIGLIO, M. (2004). The importance of being interactive. In *New visions in performance : The impact of Digital Technologies*, pages 5–12. Carven, G. and Beardon, C., Swets and Zeitlinger Lisse, The Netherlands. 12, 14
- CORNWALL, J. (2005). Efficient multiple pass, multiple output algorithms on the gpu. In *2nd European Conference on Visual Media Production*, pages 253–262. Cite-seer. 99
- COUGHLAN, T. et JOHNSON, P. (2009). Understanding productive, structural and longitudinal interactions in the design of tools for creative activities. In *Proceedings of the seventh ACM conference on Creativity and cognition*, pages 155–164. ACM. 29, 192
- COURTY, N. et ARNAUD, E. (2008). Inverse kinematics using sequential monte carlo methods. *Articulated Motion and Deformable Objects*, 5098:1–10. 74
- COWIE, R., DOUGLAS-COWIE, E., TSAPATSOULIS, N., VOTSIS, G., KOLLIAS, S., FELLEENZ, W. et TAYLOR, J. (2001). Emotion recognition in human-computer interaction. *IEEE Signal Processing Magazine*, 18(1):32–80. 43
- DELAHUNTA, S. (2002). Software for dancers : coding forms. *Performance Research journal*, 7(2):96–102. 17
- DELAHUNTA, S. (2007). *Capturing intention : documentation, analysis and notation research based on the work of Emio Greco | PC*. Emio Greco | PC and Amsterdam School of the Arts. 21, 49
- DELLAERT, F., FOX, D., BURGARD, W. et THRUN, S. (1999). Monte carlo localization for mobile robots. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, volume 2, pages 1322–1328. IEE. 74

- DELPRAT, N., LEROUX, C. et FDILI ALAOUI, S. (2011a). Experience of a cloud-avatar : scientific challenges and artistic perspectives. *International Journal of Design and Innovation Research (IJODIR)*, 6(1):127–143. 25, 88
- DELPRAT, N., LEROUX, C. et FDILI ALAOUI, S. (2011b). In the clouds, virtual experience of a matter. *In Proceedings of Virtual Reality International Conference (VRIC)*, Laval, France. 25, 88
- DIX, A. (2004). *Human-computer interaction*. Prentice hall. 22
- DIX, A., SHERIDAN, J., REEVES, S., BENFORD, S. et O'MALLEY, C. (2005). Formalising performative interaction. *International Workshop on Design, Specification and Verification of Interactive Systems (DSVIS)*, in *Lecture Notes in Computer Science.*, 3941:15–25. 28
- DIXON, S. (2007). *Digital performance : a history of new media in theater, dance, performance art, and installation*. MIT press. 11
- DOBASHI, Y., KANEDA, K., YAMASHITA, H., OKITA, T. et NISHITA, T. (2000). A simple, efficient method for realistic animation of clouds. *In Proceedings of the conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 19–28. ACM. 88
- DOUCET, A., GODSILL, S. et ANDRIEU, C. (2000). On sequential monte carlo sampling methods for bayesian filtering. *Statistics and computing*, 10(3):197–208. 74
- DOURISH, P. (2004). *Where the action is : the foundations of embodied interaction*. MIT press. 24, 25
- DYABERI, V. M., SUNDARAM, H., JAMES, J. et QIAN, G. (2004). Phrase structure detection in dance. *In Proceedings of the International Conference on Multimedia (SIGMM)*, pages 332–335. ACM. 61
- ENGLAND, D. (2011). Whole body interaction : An introduction. *In Whole Body Interaction*, chapitre 1. Springer. 24
- ENGLAND, D., RUPEREZ, M., BOTTO, C., NIMOY, J. et POULTER, S. (2007). Creative technology and hci. *In Proceedings of the annual international conference of Human-Computer Interactions Educators*. 28
- ENGLAND, D., SHERIDAN, J. et CRANE, B. (2010). Whole body interaction 2010. *In Proceedings of the International Conference on Human Factors in Computing Systems (SIGCHI)*, pages 4465–4468. ACM. 2, 28
- FALLMAN, D. (2011). The new good : Exploring the potential of philosophy of technology to contribute to human-computer interaction. *In Proceedings of the International Conference on Human Factors in Computing Systems (SIGCHI)*, pages 1051–1060. ACM. 22, 23
- FDILI ALAOUI, S., BEVILACQUA, B., BERMUDEZ, B. et JACQUEMIN, C. (2013). Dance interaction with physical model visualization based on movement qualities. *International Journal of Arts and Technology (IJART)* (accepted). 63, 107, 131, 133, 156

- FDILI ALAOU, S., CARAMIAUX, B. et SERRANO, M. (2011). From dance to touch : movement qualities for interaction design. *In Proceedings of the International Conference on Human Factors in Computing Systems (SIGCHI)*, pages 1465–1470. ACM. 63, 120
- FDILI ALAOU, S., CARAMIAUX, B., SERRANO, M. et BEVILACQUA, F. (2012). Dance movement qualities as interaction modality. *In Proceedings of the Conference on Designing Interactive Systems (DIS)*, pages 761–769. ACM. 63, 119, 120
- FELTHAM, F., HUR, Y. et MCWATERS, M. (2011). The experiential design move : an approach to reflective practice for embodied and movement based interaction. *In Proceeding of the Workshop the body in design in the Australian Computer Human Conference (OZCHI)*, pages 9–12. 25
- FERNANDES, C. et COSTA, R. (2010). Looking for the linguistic knowledge behind the curtains of contemporary dance : the case of rui horta's creative process. *International Journal of Arts and Technology (IJART)*, 3(2):235–250. 20
- FITTS, P. (1954). The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement. *Journal of experimental psychology*, 47(6):381–391. 37
- FLASH, T. et HOGAN, N. (1985). The coordination of arm movements : an experimentally confirmed mathematical model. *The journal of Neuroscience*, 5(7):1688–1703. 38
- FREEMAN, F. (1914). Experimental analysis of the writing movement. *Psychological Monographs : General and Applied*, 17(4):1–57. 37
- GALLAHER, P. (1992). Individual differences in nonverbal behavior : Dimensions of style. *Journal of Personality and Social Psychology*, 63(1):133–145. 44
- GALLESE, V. (2005). Embodied simulation : from neurons to phenomenal experience. *Phenomenology and Cognitive Sciences*, 4(1):23–48. 25
- GARCIA, J., TSANDILAS, T., AGON, C. et MACKAY, W. (2012). Interactive paper substrates to support musical creation. *In Proceedings of the International Conference on Human Factors in Computing Systems (SIGCHI)*, pages 1825–1828. ACM. 29
- GAVER, W., BOUCHER, A., PENNINGTON, S. et WALKER, B. (2004a). Cultural probes and the value of uncertainty. *interactions*, 11(5):53–56. 29
- GAVER, W., BOWERS, J., BOUCHER, A., GELLERSON, H., PENNINGTON, S., SCHMIDT, A., STEED, A., VILLARS, N. et WALKER, B. (2004b). The drift table : designing for ludic engagement. *In Proceedings of the International Conference on Human Factors in Computing Systems (SIGCHI)*, pages 885–900. ACM. 23, 27
- GEORGII, J. et WESTERMANN, R. (2005). Mass-spring systems on the gpu. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 13(8):693–702. 97
- GIBET, S. (2002). *Modèles d'Analyse et Synthèse du Mouvement*. Thèse d'Habilitation à Diriger des Recherches. 69



- GIBET, S. (2009). Sensorimotor control of sound-producing gestures. In *Musical Gestures : Sound, Movement, and Meaning*, pages 212–237. 37
- GIBET, S., KAMP, J. et POIRIER, F. (2004). Gesture analysis : Invariant laws in movement. In *Gesture-Based Communication in Human-Computer Interaction In Lecture Note in Computer Science*, 2915:1–9. 38
- GIBET, S. et MARTEAU, P. (1992). Nonlinear feedback model of sensori-motor system. In *The International Conference on Automation, Robotics and Computer Vision, Singapore*. 38
- GODARD, H. (1995). Le geste et sa perception, postface. In *La danse du XX siècle*, pages 236–243. Bordas. 41, 42
- GUIARD, Y., BEAUDOUIN-LAFON, M. et MOTTET, D. (1999). Navigation as multiscale pointing : extending fitts' model to very high precision tasks. In *Proceedings of the International Conference on Human Factors in Computing Systems (SIGCHI)*, pages 450–457. ACM. 37
- GUILBAUD, C. (2002). *Modélisation et visualisation de phénomènes naturels simulés par système physique particulière*. Thèse de doctorat, INP Grenoble. 91
- HANDSCHIN, J. et MAYNE, D. (1969). Monte carlo techniques to estimate the conditional expectation in multi-stage non-linear filtering. *International journal of control*, 9(5):547–559. 74
- HANSEN, M. (2006). *Bodies in code : interfaces with digital media*. Routledge. 11
- HASHIM, W., NOOR, N. et ADNAN, W. (2009). The design of aesthetic interaction : towards a graceful interaction framework. In *Proceedings of the 2nd International Conference on Interaction Sciences : Information Technology, Culture and Human*, pages 69–75. ACM. 47
- HASHIMOTO, S. (1997). Kansei as the third target of information processing and related topics in japan. In *Proceedings of the International Workshop on KANSEI : The technology of emotion*, pages 101–104. 43
- HASSENZAHL, M. (2008). User experience (ux) : towards an experiential perspective on product quality. In *Proceedings of the International Conference of the Association Francophone d'Interaction Homme-Machine*, pages 11–15. ACM. 31
- HIETANEN, J., LEPPÄNEN, J. et LEHTONEN, U. (2004). Perception of emotions in the hand movement quality of finnish sign language. *Journal of Nonverbal Behavior*, 28(1):53–64. 46
- HÖÖK, K., SENGER, P. et ANDERSSON, G. (2003). Sense and sensibility : evaluation and interactive art. In *Proceedings of the International Conference on Human Factors in Computing Systems (SIGCHI)*, pages 241–248. ACM. 30
- HSIEH, C.-M. (2007). *Grammar of Physically Based Modeling of Dance Movements : Use for Choreographic Composition*. Thèse de doctorat, INP Grenoble. 91

- HSIEH, C.-M. et LUCIANI, A. (2005). Generating dance verbs and assisting computer choreography. In *Proceedings of the International Conference on Multimedia (SIGMM)*, pages 774–782. ACM. 89
- ISARD, M. et BLAKE, A. (1998a). Condensation conditional density propagation for visual tracking. *International journal of computer vision*, 29(1):5–28. 74
- ISARD, M. et BLAKE, A. (1998b). A mixed-state condensation tracker with automatic model-switching. In *Proceedings of the 6th International Conference on Computer Vision*, pages 107–112. IEEE. 74
- JACQUEMIN, C. (2008). Allegra : a new instrument for bringing interactive graphics to life. In *Proceedings of the International Conference on Multimedia (SIGMM)*, pages 961–964. ACM. 89, 97
- JACUCCI, G., SPAGNOLLI, A., CHALAMBALAKIS, A., MORRISON, A., LIIKKANEN, L., ROVEDA, S. et BERTONCINI, M. (2009). Bodily explorations in space : Social experience of a multimodal art installation. In *proceedings of the conference on Human-Computer Interaction-INTERACT 2009*, pages 62–75. 29
- JAMES, J., INGALLS, T., QIAN, G., OLSEN, L., WHITELEY, D., WONG, S. et RIKAKIS, T. (2006). Movement-based interactive dance performance. In *Proceedings of the International Conference on Multimedia (SIGMM)*, pages 470–480. ACM. 61
- JOHNSTON, A. (2009). *Interfaces for Musical Expression Based on Simulated Physical Models*. Thèse de doctorat, University of technology, Sydney. 91
- JOHNSTON, A., CANDY, L. et EDMONDS, E. (2009). Designing for conversational interaction. In *Proceedings of New Interfaces for Musical Expression (NIME)*. 91
- KENDON, A. (1988). How gestures can become like words. *Cross-cultural perspectives in nonverbal communication*, pages 131–141. 36
- KENDON, A. (2004). *Gesture : Visible action as utterance*. Cambridge University Press. 34, 36
- KJÖLBERG, J. (2004). Designing full body movement interaction using modern dance as a starting point. In *Proceedings of the Conference on Designing Interactive Systems (DIS)*, pages 353–356. ACM. 26, 47
- KOHLER, E., KEYSERS, C., UMILTA, M., FOGASSI, L., GALLESE, V. et RIZZOLATTI, G. (2002). Hearing sounds, understanding actions : action representation in mirror neurons. *Science*, 297(5582):846. 25
- KRUEGER, M., GIONFRIDDO, T. et HINRICHSSEN, K. (1985). Videoplace an artificial reality. In *Proceedings of the International Conference on Human Factors in Computing Systems (SIGCHI)*, pages 35–40. ACM. 12
- KURTENBACH, G. et HULTEEN, E. (1990). Gestures in human-computer communication. In *The art of human-computer interface design*, pages 309–317. Addison Wesley. 23, 34, 43
- LABAN, R. (1963). *Modern Educational Dance*. Macdonald & Evans, London. 39, 61

- LABAN, R. (1994). *La Maîtrise du Mouvement*. Actes Sud, Arles. 16, 38, 39, 40, 41, 47
- LABAN, R. (2003). *Espace Dynamique*. Contredanse. 39
- LATULIPE, C., CARROLL, E. et LOTTRIDGE, D. (2011a). Evaluating longitudinal projects combining technology with temporal arts. In *Proceedings of the International Conference on Human Factors in Computing Systems (SIGCHI)*, pages 1835–1844. ACM. 30
- LATULIPE, C., CARROLL, E. et LOTTRIDGE, D. (2011b). Love, hate, arousal and engagement : exploring audience responses to performing arts. In *Proceedings of the International Conference on Human Factors in Computing Systems (SIGCHI)*, pages 1845–1854. ACM. 30
- LAW, E., ROTO, V., HASSENZAHL, M., VERMEEREN, A. et KORT, J. (2009). Understanding, scoping and defining user experience : a survey approach. In *Proceedings of the International Conference on Human Factors in Computing Systems (SIGCHI)*, pages 719–728. ACM. 31
- LJUNG, L. (1987). *System Identification : Theory for the User*. Prentice-Hall,. 72, 120
- LOCKHART, A., PEASE, E., FLOOD, J., ADAMSON, Q., QUINTON, E. et KERKHOVEN, W. (1966). *Modern dance ; building and teaching lessons*. WC Brown Company. 55
- LOKE, L. et ROBERTSON, T. (2010). Studies of dancers : Moving from experience to interaction design. *International Journal of Design*, 4(2):39–54. 25
- LOUPPE, L. (1997). *Poétique de la danse contemporaine*. Contredanse. 34, 40, 41, 43
- LOUPPE, L., DOBBELS, D., VIRILIO, P. et THOM, R. (1991). *Danses Tracées*. Edition Dis Voir, Paris. 40
- LYOTARD, J. (1984). The sublime and the avant-garde. *The Lyotard Reader*, 205. 27
- MACKAY, W. (2000). *Video Techniques for Participatory Design : Observation, Brainstorming & Prototyping*. ACM. 29
- MACKAY, W. et DAVENPORT, G. (1989). Virtual video editing in interactive multimedia applications. *Communications of the ACM*, 32(7):802–810. 29
- MACKAY, W. et FAYARD, A. (1999). Video brainstorming and prototyping : techniques for participatory design. In *Proceedings of the International Conference on Human Factors in Computing Systems (SIGCHI)*, pages 118–119. ACM. 29
- MACKENZIE, I. (1992). Fitts' law as a research and design tool in human-computer interaction. *Human-computer interaction*, 7(1):91–139. 37
- MCNEILL, D. (1996). *Hand and mind : What gestures reveal about thought*. University of Chicago Press. 36
- MCNEILL, D. (2000). *Language and gesture*. Cambridge University Press Pr. 23, 36
- MERLEAU-PONTY, M. (1968). *Résumé de cours au Collège de France*. Paris, Gallimard. 25

- MITRA, S. et ACHARYA, T. (2007). Gesture recognition : A survey. *Systems, Man, and Cybernetics, Part C : Applications and Reviews, IEEE Transactions on*, 37(3):311–324. 59
- MOEN, J. (2006). *KinAesthetic movement interaction : designing for the pleasure of motion*. Thèse de doctorat, KTH. 26, 28
- MOEN, J. (2007). From hand-held to body-worn : embodied experiences of the design and use of a wearable movement-based interaction concept. In *Proceedings of the 1st international conference on Tangible and embedded interaction*, pages 251–258. ACM. 47
- MOEN, J. et SANDSJÖ, J. (2005). Bodybug-design of kinaesthetic interaction. In *Digital Proceedings of NORDES In the Making*, Copenhagen. Citeseer. 26
- MOMENI, A. et HENRY, C. (2006). Dynamic independent mapping layers for concurrent control of audio and video synthesis. *Computer Music Journal*, volume 30(1):Pages 49–66. 89
- MOTAMEDI, N. (2007). The aesthetics of touch in interaction design. In *Proceedings of the Conference on Designing Pleasurable Products and Interfaces*, pages 455–460. ACM. 26, 121
- MURPHY, K. (1998). Switching kalman filters. *Dept. of Computer Science, University of California, Berkeley, Tech. Rep.* 78
- MYERS, C. et RABINER, L. (1981). A comparative study of several dynamic time-warping algorithms for connected word recognition. *The Bell System Technical Journal*, 60(7):1389–1409. 83
- NELSON, W. (1983). Physical principles for economies of skilled movements. *Biological Cybernetics Journal*, 46(2):135–147. 38
- NOË, A. (2005). *Action in Perception*. MIT Press. 25
- OH, S., REHG, J., BALCH, T. et DELLAERT, F. (2008). Learning and inferring motion patterns using parametric segmental switching linear dynamic systems. *International Journal of Computer Vision*, 77(1):103–124. 78
- O'NEILL, E. et JOHNSON, P. (2004). Participatory task modelling : users and developers modelling users' tasks and domains. In *Proceedings of the 3rd annual conference on Task models and diagrams*, pages 67–74. ACM. 29
- PALAZZI, M. et SHAW, N. Z. (2009). Synchronous objects for one flat thing, reproduced. In *Proceedings of the Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques (SIGGRAPH)*, volume 1. 20
- PELACHAUD, C. (2005). Multimodal expressive embodied conversational agents. In *Proceedings of the International Conference on Multimedia (SIGMM)*, pages 683–689. ACM. 45
- PELACHAUD, C. (2009). Studies on gesture expressivity for a virtual agent. *Speech Communication*, 51(7):630–639. 44, 45

- PETERSEN, M., IVERSEN, O., KROGH, P. et LUDVIGSEN, M. (2004). Aesthetic interaction : a pragmatist's aesthetics of interactive systems. In *Proceedings of the Conference on Designing Interactive Systems (DIS)*, pages 269–276. ACM. 26, 121
- PIAGET, J. (1974). *Réussir et comprendre*. Presses universitaires de France. 151, 162
- PICARD, R. (1995). Affective computing. Rapport technique 321, M.I.T Media Laboratory Perceptual Computing Section Technical Report. 44
- PUCKETTE, M., UCSD, M., APEL, T. et al. (1998). Real-time audio analysis tools for pd and msp. In *Proceedings, International Computer Music Conference. San Francisco : International Computer Music Association*, pages 109–112. Citeseer. 14, 15
- QIAN, G., GUO, F., INGALLS, T., OLSON, L., JAMES, J. et RIKAKIS, T. (2004). A gesture-driven multimodal interactive dance system. In *Proceeding of the International Conference on Multimedia and Expo (ICME)*, volume 3, pages 1579–1582. IEEE. 61
- RABINER, L. R. (1989). A tutorial on hidden markov models and selected application on speech recognition. In *Proceedings of the IEEE*, pages 257–286,. 82, 85
- RAJKO, S., QIAN, G., INGALLS, T. et JAMES, J. (2007). Real-time gesture recognition with minimal training requirements and on-line learning. In *Conference on Computer Vision and Pattern Recognition.*, pages 1–8. IEEE. 61
- RASAMIMANANA, N. (2008). *Geste instrumental du violoniste en situation de jeu : analyse et modélisation*. Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie. 38
- RASAMIMANANA, N. et BEVILACQUA, F. (2008). Effort-based analysis of bowing movements : evidence of anticipation effects. *Journal of New Music Research*, 37(4):339–351. 38
- REEVES, S., BENFORD, S., O'MALLEY, C. et FRASER, M. (2005). Designing the spectator experience. In *Proceedings of the International Conference on Human Factors in Computing Systems (SIGCHI)*, pages 741–750. 28
- RETT, J. et DIAS, J. (2007). Bayesian models for laban movement analysis used in human machine interaction. In *Proceedings of ICRA Workshop on " Concept Learning for Embodied Agents*. 62
- RETT, J., DIAS, J. et AHUACTZIN, J. (2008). Laban movement analysis using a bayesian model and perspective projections. *Brain, Vision and AI*, 04(6):978–953–7619. 62
- RIMÉ, B. et SCHIARATURA, L. (1991). *Gesture and speech*. Cambridge University Press. 35
- RIZZOLATTI, G. et CRAIGHERO, L. (2004). The mirror-neuron system. *Annual Review of Neuroscience*, 27:169–192. 25
- ROKEBY, D. (1995). Transforming mirrors. *Leonardo Electronic Almanac*, 3(4). 12

- ROKEBY, D. (1998). The construction of experience : Interface as content. In *Digital Illusion : Entertaining the Future with High Technology*, pages 27–48. ACM Press New York. 12
- ROTO, V., OBRIST, M. et VÄÄNÄNEN-VAINIO-MATTILA, K. (2009). User experience evaluation methods in academic and industrial contexts. In *Proceedings of the workshop on User Experience Evaluation Methods (UXEM)*. ACM. 31
- SALTER, C. (2010). *Entangled : Technology and the Transformation of Performance*. MIT Press. 11
- SCHIPHORST, T. (2009). soft (n) : Toward a somaesthetics of touch. In *Proceedings of the International Conference on Human Factors in Computing Systems (SIGCHI)*, pages 2427–2438. ACM. 25, 26, 47
- SCHIPHORST, T., CALVERT, T., LEE, C., WELMAN, C. et GAUDET, S. (1990). Tools for interaction with the creative process of composition. In *Proceedings of the International Conference on Human Factors in Computing Systems (SIGCHI)*, pages 167–174. ACM. 28
- SCHIPHORST, T. et CUNNINGHAM, M. (1997). making dances with a computer, choreography and dance. *Harwood Academic Press*, 4(3):79–98. 17
- SCHIPHORST, T., MAH, S. et CRAWFORD, J. (1994). Still dancing : interacting inside the dance. In *Proceedings of the International Conference on Human Factors in Computing Systems (SIGCHI)*, pages 61–62. ACM. 28
- SHA, X., FORTIN, M. et ROUSSEAU, J. (2009). Calligraphic video : a phenomenological approach to dense visual interaction. In *Proceedings of the International Conference on Multimedia (SIGMM)*, pages 1091–1100. ACM. 25
- SHERIDAN, J. G., BRYAN-KINNS, N. et BAYLISS, A. (2007). Encouraging witting participation and performance in digital live art. *Proceedings of the 21st British HCI Group Annual Conference on People and Computers*. 27, 28
- SHUSTERMAN, R. (2000). *Pragmatist aesthetics : Living beauty, rethinking art*. Rowman & Littlefield Pub Inc. 26
- SPARACINO, F., DAVENPORT, G. et PENTLAND, A. (2000). Media in performance : Interactive spaces for dance, theater, circus, and museum exhibits. *IBM Systems Journal*, 39(3.4):479–510. 11
- SPARACINO, F., WREN, C., DAVENPORT, G. et PENTLAND, A. (1999). Augmented performance in dance and theater. *International Dance and Technology*, 99:25–28. 11
- SPINUZZI, C. (2005). The methodology of participatory design. *Technical Communication*, 52(2):163–174. 29, 192
- STAM, J. (1999). Stable fluids. In *Proceedings of the Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques (SIGGRAPH)*, pages 121–128. ACM. 88

- STOWELL, D., ROBERTSON, A., BRYAN-KINNS, N. et PLUMBLEY, M. D. (2009). Evaluation of live human-computer music-making : quantitative and qualitative approaches. *International Journal of Human - Computer Studies*, 67:960–975. 30, 155
- SWAMINATHAN, D., THORNBURG, H., MUMFORD, J., RAJKO, S., JAMES, J., INGALLS, T., CAMPANA, E., QIAN, G., SAMPATH, P. et PENG, B. (2009). A dynamic bayesian approach to computational laban shape quality analysis. *Advances in Human-Computer Interaction*, 2009:1–17. 61
- TANAKA, A. et KNAPP, R. (2002). Multimodal interaction in music using the electromyogram and relative position sensing. In *Proceedings of the 2002 conference on New interfaces for musical expression*, pages 1–6. National University of Singapore. 60
- TARDIEU, D., SIEBERT, X., MAZZARINO, B., CHESSINI, R., DUBOIS, J., DUPONT, S., VARNI, G. et VISENTIN, A. (2010). Browsing a dance video collection : dance analysis and interface design. *Journal on Multimodal User Interfaces*, 4(1):37–46. 20
- VARELA, F., THOMPSON, E. et ROSCH, E. (1991). *The Embodied Mind : Cognitive Science and Human Experience*. MIT Press, Cambridge, USA. 25
- VIVIANI, P. et FLASH, T. (1995). Minimum-jerk, two-thirds power law, and isochrony : converging approaches to movement planning. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 21(1):32. 38
- VOLPE, G. (2003). *Computational models of expressive gesture in Computational models of expressive gesture in multimedia systems*. Thèse de doctorat, InfoMus Lab, Genova. 16, 45, 80, 82
- WALLBOTT, H. (1998). Bodily expression of emotion. *European journal of social psychology*, 28(6):879–896. 44, 46
- WARD, K., BERTAILS, F., KIM, T., MARSCHNER, S., CANI, M. et LIN, M. (2007). A survey on hair modeling : Styling, simulation, and rendering. *Visualization and Computer Graphics, IEEE Transactions on*, 13(2):213–234. 105
- WEBB, A., KERNE, A., KOH, E., JOSHI, P., PARK, Y. et GRAEBER, R. (2006). Choreographic buttons : promoting social interaction through human movement and clear affordances. In *Proceedings of the International Conference on Multimedia (SIGMM)*, pages 451–460. ACM. 25
- WIJERS, G., DEKKERAND, A. et VAN SAAZE, V. (2010). *Extra Dry, Emio Greco Pieter C. Scholten, Inside Movement Knowledge (IMK) Documentation Mode*. ICKAmsterdam. Internal Documentation. 20
- WOLPERT, D. et GHAHRAMANI, Z. (2000). Computational principles of movement neuroscience. *Nature Neuroscience*, 3:1212–1217. 37
- WOO, W., KIM, N., WONG, K. et TADENUMA, M. (2011). Sketch on dynamic gesture tracking and analysis exploiting vision-based 3d interface. *Proc. SPIE Visual Communications and Image Processing*, 4310:656–666. 47

- WRIGHT, P., WALLACE, J. et MCCARTHY, J. (2008). Aesthetics and experience-centered design. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction (TOCHI)*, 15(4):18. 26, 121
- WUNDT, W. (1973). The language of gestures. *Mouton, The Hague*. 36
- ZHAO, L. (2001). *Synthesis and acquisition of laban movement analysis qualitative parameters for communicative gestures*. Thèse de doctorat, University of Pennsylvania, USA. 62
- ZHAO, L. et BADLER, N. (2005). Acquiring and validating motion qualities from live limb gestures. *Graphical Models journal*, 67(1):1–16. 62



