UNIVERSITÉ PARIS 8 DES CRÉATIONS

**ÉCOLE DOCTORALE N° 159 -ESTHÉTIQUE, SCIENCES ET TECHNOLOGIES DES ARTS**
Discipline : Images Numériques
Atelier de recherche : **Image Numérique et Réalité Virtuelle** (INREV) de l'unité recherche **Arts des Images et Art Contemporain** (AIAC)

**Thèse de doctorat** Pour obtenir le grade de Docteur de l'Université Paris 8

Titre de la thèse :

# D'une expression corporelle improvisée à la co-création d'une performance robotique dansée : recherche, création et développement des outils pour un robot humanoïde

**Mme Hui-Ting HONG**

Soutenue le 5 decembre 2025
sous la direction de Mme Chu-Yin CHEN

Composition du jury

| | | |
|---|---|---|
| Mme Chu-Yin CHEN, Pr. | Université Paris 8 | Directrice de thèse |
| Mme Carole HOFFMANN, Pr. | Université Toulouse Jean Jaurès | Rapporteuse |
| M. Amos FERGOMBE, Pr. | Université Polytechinique Hauts-de-France | Rapporteur |
| M. Abderrahmane KHEDDAR, Pr. et Directeur de Recherche. | CNRS-LIRMM | Examinateur |
| M. Dominique ROLAND, Directeur du CDA. | Centre des Arts Enghien-les-Bains (CDA) | Examinateur |

# Résumé

Cette thèse s'inscrit dans une démarche de recherche-création explorant la possibilité d'une co-création entre l'expression corporelle et un robot humanoïde de taille humaine. En croisant les approches des expressions corporelles improvisées et de l'ingénierie robotique, elle remet en question le paradigme d'un robot simple exécutant pour le considérer comme partenaire chorégraphique. Le geste dansé y devient un point d'entrée vers un échange évolutif, où chaque geste est une proposition ouverte, et non un déclencheur des réponses préprogrammées de la machine. La première partie est une recherche panoramique qui interroge les écarts et convergences entre le spectacle vivant et la robotique. Nous soulignons les limites des systèmes robotiques déterministes et mettons l'accent sur le rôle central du geste improvisé. La deuxième partie poursuit cette réflexion dans une pratique de recherche-création, en explorant un corpus de gestes improvisés issus de l'interaction avec des objets d'art et en les confrontant à un système virtuelle évolutive, où le geste improvisé sert de vecteur d'un dialogue homme-machine non linéaire. Enfin, la dernière partie décrit la conception et le développement d'un système interactif en temps réel avec un robot humanoïde (le GD-HRIF, nommé *Gesture Dancing Humanoid Robot Interactive Framework*), combinant reconnaissance visuelle des gestes, contrôle adaptatif, des contrôleurs robotiques spécialisés et génération chorégraphique via l'IA. Nous mettons ensuite en scène ce système dans une performance robotique dansée. Cette performance propose une interaction sensible sur la scène, où le robot devient un partenaire créatif à part entière.

À la croisée de l'expression corporelle improvisée, de la robotique et de l'intelligence artificielle, ce projet de thèse reconsidère la machine comme un partenaire créatif et sensible. Il vise à dépasser les logiques d'interactions prédéfinies pour instaurer une boucle gestuelle dynamique, où la dimension technologique ne limite pas l'expression corporelle improvisée, mais la prolonge et la transforme.

**Mots-clés :** Interaction homme-machine, interaction homme-robot, co-création artistque, geste corporelle, danse, spectacle vivant

# Abstract

This thesis is part of a research-creation approach that explores the possibility of co-creation between bodily expression and a human-sized humanoid robot. By intersecting the fields of improvised bodily expression and robotic engineering, it challenges the paradigm of the robot as a mere executor and instead considers it as a choreographic partner. Dance gestures become an entry point for an evolving exchange, where each gesture is an open proposition rather than a trigger for the machine's preprogrammed responses. The first part offers a panoramic inquiry into the gaps and convergences between live performance and robotics. It highlights the limitations of deterministic robotic systems and emphasizes the central role of improvised gestures. The second part extends this reflection into a research-creation practice, exploring a corpus of improvised gestures arising from interactions with art objects and confronting them with an evolving virtual system, where improvisational movement serves as a medium for nonlinear human-machine dialogue. Finally, the third part details the design and development of a real-time interactive system with a humanoid robot (the GD-HRIF : *Gesture Dancing Humanoid Robot Interactive Framework*), combining gesture recognition, adaptive control, specialized robotic controllers, and AI-driven choreographic generation. This system is then staged in an original danced robotic performance. The performance proposes a sensitive interaction on stage, where the robot becomes a fully-fledged creative partner.

At the crossroads of improvised bodily expression, robotics, and artificial intelligence, this thesis project reimagines the machine as a sensitive and creative partner. It seeks to move beyond predefined interaction models to establish a dynamic gestural loop, where the technological dimension does not constrain improvised physical expression, but rather extends and transforms it.

**Keywords :** Human-computer interaction, human-robot interaction, artistic co-creation, body gesture, dance, live performance

# Remerciements

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à toutes les personnes que j'ai rencontrées au cours de ce parcours. Sans leur soutien, j'aurais renoncé et n'aurais jamais atteint la fin. Cette thèse est sans doute la première fois où je me suis exprimée de manière aussi personnelle ; au fil de ce travail, j'ai découvert de nouvelles facettes de moi-même et j'ai appris à mieux me connaître que jamais.

Je tiens à remercier d'abord ma directrice de thèse Chu-Yin CHEN, pour son encouragement au cours de ces dernières années et pour m'avoir montré l'importance de l'esprit de recherche tant en art qu'en recherche-création. Je remercie également les membres du jury d'avoir consacré leur temps précieux à l'examen de cette thèse et pour l'intérêt qu'ils ont porté à la soutenance.

Je suis profondément reconnaissante à ma famille pour son soutien constant et inconditionnel. À mes parents, qui m'ont toujours encouragé à vivre pleinement le processus ; à mon cher frère, dont les conseils pertinents m'ont beaucoup aidé à avancer ; et à mon conjoint, Lu — merci d'avoir été à mes côtés dans les moments difficiles et de partager des joies qui ont rendu les épreuves plus légères.

Merci également aux membres de l'INREV. Je tiens en particulier à remercier Isadora, Marta, Pierre et Guofan : à Isa, pour ta chaleur — j'ai apprécié chaque seconde passée à travailler avec toi et ton aide dans les premiers jours, quand mon français était encore faible ; à Marta, Pierre et Guofan, pour votre soutien durant mes moments difficiles l'an dernier, qui a rendu la dernière ligne droite de ma thèse moins stressante et moins solitaire.

Je souhaite également adresser des remerciements particuliers à Abder pour m'avoir chaleureusement accueilli au LIRMM. Mon séjour là-bas a été l'une des expériences les plus marquantes de mon doctorat, m'apportant autant sur la rigueur académique que sur les défis des robots humanoïdes. Merci aux collègues rencontrés au LIRMM, qui ont patienté pour répondre à mes questions, même lorsque j'étais parfois réservée. Un remerciement tout particulier à Youcan et Arnaud, dont la gentillesse et le soutien ont rendu mon séjour au LIRMM vraiment mémorable.

Enfin, je remercie le gouvernement de Taiwan pour le soutien financier, EUR ArTec pour l'opportunité de projet, et le Centre des arts d'Enghien-les-bains pour m'avoir offert l'inestimable expérience de participer à deux années consécutives de résidences d'artiste.

# Table des matières

**Résumé** **3**

**Remerciements** **7**

**Table des matières** **9**

**Introduction Générale** **15**

**Partie I : Recherche panoramique : de l'expression corporelle dans le spectacle vivant aux performances robotiques dansées** **23**

**I.1 L'expression corporelle dans le spectacle vivant** **25**
I.1.1 La création des gestes dansés . . . . . 27
I.1.2 L'improvisation des expressions corporelles . . . . . 31
I.1.3 Vers la co-création homme-machine . . . . . 35

**I.2 Les robots dans la performance dansée** **45**
I.2.1 Typologie des robots scéniques . . . . . 48
I.2.1.1 Les robots non-humanoïdes . . . . . 48
I.2.1.2 Les robots humanoïdes . . . . . 51
I.2.2 Les performances robotiques . . . . . 57
I.2.2.1 Démonstrations purement robotiques . . . . . 57
I.2.2.2 Performances homme–robot . . . . . 58

**Conclusion** **67**

**Partie II : L'expression corporelle improvisée face aux artefacts et entités virtuelles** **71**

**II.1 Expression corporelle improvisée au sein des objets d'art** **73**
II.1.1 La calligraphie et le bouddha dans la culture chinoise . . . . . 75
II.1.2 La création du geste avec les artefacts : un projet de recherche-création « Écologies Artistiques et Numériques des Corps Vivants au Musée » . . . . . 80

II.1.2.1 Un musée caché et un espace immersif . . . . . 82
II.1.2.2 Élaboration d'une grammaire pour l'improvisation corporelle 84

**II.2 Vers l'interaction d'une expression corporelle improvisée avec une machine virtuelle autonome 93**
II.2.1 L'écosystème virtuel évolutif (E.V.E.) du point de vue de la danseuse 95
II.2.2 La co-création avec E.V.E. . . . . 100
II.2.2.1 Le mécanisme clé qui inspire la co-création de gestes corporels avec E.V.E. . . . . 100
II.2.2.2 Trois principes pour étendre les gestes corporels et la création de gestes corporels en collaboration avec E.V.E. . . . . 101
II.2.3 La performance « Le Mythe d'immorta » . . . . . 105
II.2.3.1 Indices des trois saisons . . . . . 106
II.2.3.2 Je ne danse pas seul . . . . . 107
II.2.3.3 De l'interaction homme-machine virtuelle à la machine physique . . . . . 112

**Conclusion 117**

**Partie III : Dévéloppement et co-création pour une performance robotique dansée 119**

**III.1 Enjeux de la performance interactive avec un robot humanoïde de taille humaine 121**
III.1.1 La stabilisation et les performances dansées . . . . . 123
III.1.2 Outils développés en scénario industriel . . . . . 130

**III.2 Recherche et développement des outils pour la co-création avec robot humanoïde 135**
III.2.1 L'objectif de créer un framework interactif . . . . . 137
III.2.1.1 Processus de création artistique d'une performance dansée 138
III.2.2 Interface du contrôle du HRP-4, mc_rtc . . . . . 145
III.2.3 Architecture et développement d'un système interactif gestuel, GD-HRIF . . . . . 151
III.2.3.1 Système de reconnaissance visuelle du robot . . . . . 152
III.2.3.2 Contrôle des mouvements interactif autonome du robot à l'aide d'une *policy function* . . . . . 157

**III.3 Mise en situation de l'outil : une performance dansée avec un robot humanoid HRP-4 163**
III.3.1 Intégration des outils robotique dans la création artistique . . . . . 165

III.3.1.1 Contrôleur de tâches de posture . . . . . 165
III.3.1.2 Contrôleur de *Finite State Machine* . . . . . 166
III.3.1.3 Contrôleur de stabilisation . . . . . 169
III.3.1.4 Contrôleur de *retargeting* de capture de mouvement . . . . . 169
III.3.2 Pipeline complet de la co-création entre ingénier, *creative technologist*, danseuse et metteuse en scène . . . . . 178
III.3.2.1 Précision technique - travail entre *creative technologist* et ingénieur robotique . . . . . 180
III.3.2.2 Création d'un contexte pour l'incarnation du développement technologie – une dramaturgie . . . . . 190
III.3.3 Une performance robotique dansée . . . . . 192
III.3.3.1 La premier phase : peur et vulnérabilité . . . . . 196
III.3.3.2 La deuxième phase : surprise et curiosité . . . . . 198
III.3.3.3 La troisième phase : intégration et interaction . . . . . 198
III.3.3.4 La quatrième phase : catharsis émotionnelle et revitalisation 199

**III.4 Vers la co-création avec l'IA : génération de mouvements 203**
III.4.1 Modèle de génération de danse basé sur diffusion . . . . . 205
III.4.2 Mapping cinématique et adaptation au HRP-4 . . . . . 208
III.4.3 Intégration en temps réel et retour d'expérience artistique . . . . . 212

**Conclusion 217**

**Conclusion Générale 221**

**Bibliographie 227**

**Conferences Internationales 241**

**Table des figures 245**

# Introduction

# Introduction Générale

Lorsque j'ai commencé mes études en ingénier élétronique et informatique (EECS) à la National Tsing Hua University — d'abord en Bachelor (2013-2017), puis en Master (2017-2020), je n'imaginais pas que mon intérêt pour l'expression corporalle finirait par s'entremêler de manière si profonde avec mes compétences techniques. Pourtant, c'est précisément ce mariage entre l'expression corporelle et la technologie qui a progressivement orienté mes choix professionnels et académiques, jusqu'à donner naissance à cette thèse.

En 2018, j'ai eu l'opportunité de participer en tant que danseuse à « UniTreatment », une performance dansée à Taipei dans le cadre de Taipei Fringe Festival. J'ai été confronté à la puissance évocatrice du corps comme vecteur d'émotions et de mémoire. Durant cette performance j'ai ressenti pour la première fois que mes gestes—issu à la fois de mes racines taïwanaises et de mon intuition des expression corporelle—non seulement comme une trace de mes experiences, mais aussi comme un médium capable d'ouvrir un dialogue avec l'environnement. Cette première expérience a éveillé en moi une curiosité profonde : qu'est-ce qui façonne mon rapport au corps ? De quelles manières mes origines culturelles et mes vécus influencent-ils la manière dont je perçois et crée avec mon corps ?

De 2020 à 2021 chez MediaTek, j'ai travaillé en tant qu'ingénieur logiciel dans l'équipe R&D[1], visant à intégrer des fonctions d'apprentissage automatique et de

1. R&D signifie « Recherche et Développement », c'est un département dédié à l'exploration de technologies avancées et à la conception de solutions innovantes. Elle est souvent composée de chercheurs et d'ingénieurs spécialisés, travaillant sur des algorithmes de nouvelle génération, avec une forte composante expérimentale et scientifique.

traitement du signal directement dans des puces afin de réaliser le système de reconnaissance vocale. Cette experience de travail professional m'a permis de comprendre, en profondeur, comment contrôler, communiquer et optimiser les performances[2] d'une machine : de la simulation en machine virtuel aux machines embarqués (casque audio, smartphone). C'est en observant la manière dont un dispositif électronique interprète et transforme des signaux numériques que j'ai commencé à me demander : Et si la machine — qu'elle soit une machine interactive, une machine virtuelle, ou même un robot— n'était pas seulement un outil, mais un partenaire capable d'étendre mon champ d'exploration de l'expression gestuelle ?

Cette interrogation a peu à peu donné naissance à mon projet de doctorat : **D'une expression corporelle improvisée à la co-création d'une performance robotique dansée : recherche, création et développement des outils pour un robot humanoïde**, en tirant parti à la fois de mes connaissances techniques (systèmes embarqués, apprentissage automatique) et ma sensibilité corporelle : le geste dansé ne se contente pas d'être capté, mais devient un partenaire actif d'un processus créatif hybride. Un an après, j'ai ainsi rejoint l'Université Paris VIII en Doctorat d'Esthétique, Sciences et Technologies des Arts. Cette recherche doctorale est soutenue par la bourse de *Government Scholarship for Study Abroad (GSSA)* de Taïwan et menée principalement dans le cadre du projet CECCI-H2M (Co-évolution, Co-création et improvisation Homme-Machine, 2021-2023), financé par l'EUR ArTeC. Le travail a également bénéficié du soutien du CNRS-LIRMM (Laboratoire d'Informatique, de Robotique et de Microélectronique de Montpellier) ainsi que d'une bourse de recherche-création doctorale d'un an (2024) de l'EUR ArTeC : *Conception d'un Système d'Intelligence Artificielle pour la Danse Improvisée Homme-Robot Humanoïde*.

Cette thèse se propose d'articuler deux pôles : d'une part, une réflexion esthétique

2. Ici, le mot 'performaance' désigne le capacité d'un système (ordinateur, processeur, algorithme, etc.) à exécuter des tâches de manière efficace, rapide et fiable. Elle se mesure par vitesse de traitement, la consommation de ressources et la précision.

sur la nature du geste dansé partagé entre l'humain et la machine, et, d'autre part, la mise en œuvre technique de systèmes interactifs autonomes adaptés à la captation et à la génération des mouvements corporelles.

Nous avons donc formulé les questions centrales qui structurent ma démarche doctorale. D'abord, **comment imaginer une interaction où le geste dansé ne se limite pas à déclencher des réponses préprogrammées, mais s'inscrit dans une boucle dynamique de co-création ?** Nous cherchions à dépasser le modèle conventionnel des spectacle vivants, où l'on assiste souvent à un scénario dans lequel les danseurs déclenchent une réaction fixe de la machine, sans véritable possibilité de rétroaction. Ici, il s'agissait de permettre à la machine de proposer elle-même des variations, inspirées par le geste de la danseuse, puis de laisser les danseurs réagir à ces suggestions, et ainsi de suite, en un aller-retour permanent.

Ensuite, nous nous interrogeons sur **la manière d'établir un dialogue partagé entre l'homme et la machine, en tirant parti de gestes inspirés par l'interaction avec des objets d'art (calligraphies, sculptures), afin de les inscrire dans un processus de recherche-création au sein d'une improvisation corporelle impliquant à la fois une machine virtuelle et un robot physique.** Dans cette perspective, la danseuse ne danse pas pour un rôle figé, mais pour éprouver une forme d'altérité à travers la machine, qui devient co-créateur d'expressions corporelles.

Enfin, un enjeu technologique tout aussi crucial était de **concevoir un système interactif suffisamment flexible pour favoriser l'improvisation, tout en conservant la stabilité nécessaire pour assurer la sécurité et la fiabilité d'un robot humanoïde, ainsi que de rendre ces outils accessibles à une communauté d'artistes.** Il ne s'agissait pas seulement de coder un algorithme sophistiqué, mais aussi de penser un environnement logiciel modulable, reposant sur des

frameworks ouverts comme mc_rtc[3] et sur une architecture gestuelle (que j'ai nommée GD-HRIF, pour *Gesture Dancing Humanoid Robot Interactive Framework*), de manière à ce que chaque nouvel utilisateur — danseur, chorégraphe, ingénieur — puisse s'approprier l'outil sans repartir de zéro.

Pour ancrer cette démarche, nous nous appuyons sur deux grands axes théoriques :

— L'approche de l'énaction : « Agir pour percevoir, percevoir pour agir » : cette maxime sur la notion de l'énaction, dont Francisco Varela a développé les principes, a guidé ma réflexion. Dans ce paradigme, on ne conçoit plus la perception comme un simple enregistrement de l'extérieur, ni l'action comme une réponse mécanique à un stimulus. C'est l'entrelacs entre le geste et l'environnement qui nous guide. L' énaction propose donc que la perception et l'action soient co-constitutives. Autrement dit, on ne perçoit pas le monde de façon passive ; c'est au travers de nos gestes et de nos interactions que le monde émerge. Cette perspective s'oppose à une vision linéaire où l'on capte d'abord un signal, via un capteur, pour ensuite exécuter un mouvement. Dans cette approche, chaque expression corporelle est porteuse de sens, et c'est en la proposant au système que celui-ci s'en saisit, la transforme, puis la renvoie — créant ainsi une boucle continue de partage et de co-évolution des expressions corporelles avec la machine.

— Le paradigme de l'apprentissage par renforcement : L'apprentissage par renforcement (*Reinforcement Learning* ou RL) est un cadre dans lequel un agent apprend à optimiser son comportement à travers un processus de récompense et de punition, guidé par ses interactions avec l'environnement. À chaque étape, l'agent perçoit d'abord l'état actuel de l'environnement—un instantané des informations pertinentes qui façonnent sa compréhension de la situation. Sur la base de cette perception, il sélectionne une action à l'aide d'une *policy function* et reçoit un retour sous forme de récompense, qui quantifie la

3. mc_rtc est une interface *open-source* conçue pour la simulation et le contrôle des systèmes robotiques, voir section III.2.2

désirabilité du résultat obtenu. Ce cycle de perception, d'action et de rétroaction permet à l'agent d'affiner progressivement sa stratégie afin de maximiser la récompense à long terme[4]. Dans la robotique et l'intelligence artificielle, *Reinforcement Learning* désigne un processus par lequel un agent cherche à maximiser une fonction de récompense en testant différentes actions dans un environnement. Autrement dit, *Reinforcement Learning* suppose, de manière implicite, une relation linéaire où la perception précède et détermine l'action. Si l'on transpose ce schéma au geste dansée, le « corps » devient l'agent, le « geste » est l'action, et l'« environnement » englobe la machine et le contexte scénique. Notre hypothèse est que, pour que l'interaction soit véritablement co-créative, il faut repenser le *Reinforcement Learning* non pas comme un simple système autonome (où la machine finit par mûrir un comportement optimal), mais comme un processus collaboratif où l'humain et la machine découvrent ensemble de nouvelles trajectoires gestuelles. Cette relecture du *Reinforcement Learning* en mode artistique permet de passer d'un paradigme de contrôle unidirectionnel à un paradigme d'imprévu, de co-création et de co-évolution du geste.

Pour répondre à ces enjeux, la thèse s'articule en trois grandes parties (Partie I à III) :

**Partie I : Recherche panoramique : de l'expression corporelle dans le spectacle vivant aux performances robotiques dansées**

Nous allons voir d'abord la place du geste dansé dans le spectacle vivant, depuis les formes traditionnelles jusqu'aux expérimentations les plus récentes en danse contemporaine. Nous explorons ensuite l'évolution des approches robotiques dansées, depuis les dispositifs préprogrammés jusqu'aux premières tentatives d'interaction plus libre. L'objectif est de mettre en lumière les écarts entre ces deux mondes et d'identifier des approches émergentes pour une co-création

4. Un exemple emblématique est AlphaGo, développé par Google DeepMind, qui a démontré des performances remarquables dans le jeu de Go en maîtrisant des stratégies grâce à l'apprentissage par renforcement.

homme-robot.

**Partie II : L'expression corporelle improvisée face aux artefacts et entités virtuelles**

Nous examinerons un ensemble de principes gestuels élaborés à travers l'interaction avec des objets d'art (calligraphies, sculptures, installations immersives) pour nourrir une recherche-création fondée sur l'improvisation, où un écosystème virtuel — E.V.E.[5] — servirait à prolonger et à transformer le geste dansé. Il s'agit d'un dispositif multimodal (caméras, capteurs, logiciels de synthèse) capable non seulement de réagir aux expressions corporelles, mais aussi d'adapter sa sortie images en fonction des indices provenant des gestes de la danseuse, lesquels sont construits selon l'orientation artistique de notre dramaturgie. Ces expérimentations ont été présentées lors de la performance « Le Mythe d'immorta » (section II.2.3), où le geste improvisé se déploie selon trois saisons symboliques — l'automne, l'hiver et le printemps — chacune incarnée par un ensemble de paramètres visuels et sonores que nous pilotions collectivement avec l'écosystème virtuel. Le principe était toujours le même : éviter le système cause-effet préprogrammé — lorsque je fais X, la machine fait Y — pour favoriser une relation où la machine propose aussi des impulsions, et où l'improvisation s'appuie sur une règle interne propre à cet écosystème virtuel.

**Partie III : Dévéloppement et co-création pour une performance robotique dansée**

La troisième partie de cette thèse est consacrée à la transposition des principes d'expression corporelle établis dans la partie II vers un robot humanoïde de taille humaine, le HRP-4. L'objectif était double : d'une part, vérifier que la dynamique d'échange du geste puisse se maintenir lorsque l'entité n'est plus seulement

5. L'Écosystème Virtuel Évolutif (E.V.E.) représente un système numérique autonome, permettant une co-création symbiotique entre les danseurs et un système d'images de synthèse. Développé par la Dr. Isadora TELES de CASTRO, thèse de doctorat : « Scénographie-personnage : Création d'artefacts virtuels autonomes pour les arts de la scène »

virtuelle, mais s'incarne dans un corps mécanique soumis à des contraintes physiques importantes tels que l'équilibre, l'inertie et les limites articulaires ; d'autre part, fournir aux chorégraphes et aux artistes une boîte à outils modulaire pour construire leurs performances, y compris interfaces gestuelles, bibliothèques des fonctions, gestion des priorités de mouvement, etc. Sur le plan technique, nous avons développé un framework interactif basé sur mc_rtc, nommée GD-HRIF(pour *Gesture Dancing Humanoid Robot Interactive Framework*) auquel nous avons intégré un module spécifique de reconnaissance visuelle des postures, capable d'extraire des *feature* chorégraphiques — par exemple, l'arc d'un foulé, la vitesse d'un port de bras, la symétrie ou l'asymétrie d'une position. Ces *feature* sont alors interprétés selon une *policy function*, inspirée des principes de l'apprentissage par renforcement, mais orientée de manière énactive : la machine choisit, parmi plusieurs variantes motrices [6], celles qui maximisent un critère combinant stabilité et improvisation. L'enjeu était de faire émerger, au final, un corps mécanique capable d'improviser dans les marges techniques qui lui sont permises.

En tissant ensemble plusieurs approches – phénoménologie, énaction et apprentissage par renforcement, nous avançons dans cette thèse l'hypothèse selon laquelle il est possible de reconsidérer la machine non comme un objet passif soumis aux expressions corporelles de la danseuse, mais comme un partenaire capable d'initier des propositions chorégraphiques. Dans ce schéma renouvelé, les expressions corporelles deviennent le vecteur d'une co-création où l'intention artistique prime à la fois sur l'efficacité algorithmique et sur l'exécution mécanique.

6. différentes manières de bouger ou formes d'exécution corporelle d'un mouvement

# Première partie

# Recherche panoramique : de l'expression corporelle dans le spectacle vivant aux performances robotiques dansées

# Chapitre I.1

# L'expression corporelle dans le spectacle vivant

## Introduction

La création du geste dansé repose sur l'élaboration d'un vocabulaire formel et technique, défini par le chorégraphe et inscrit dans une tradition classique, moderne ou contemporaine. Ce processus engage une réflexion sur les principes de l'Espace, le Temps, le Poids et le Flux, formalisés par Rudolf Laban[7]. Dans cette lignée, des grandes figures de la danse moderne ont développé leurs propres systèmes de codification du mouvement, approfondissant ou réorientant ces principes en fonction de leur vision artistique. C'est le cas de Martha Graham[8], qui a élaboré une technique centrée sur le principe de la contraction et du relâchement. Celle-ci constitue un langage chorégraphique structuré, qui organise dynamiques, énergies et trajectoires du corps. Le geste n'est pas un simple mouvement : il est un signe, ouvrant à des dimensions expressives, symboliques ou narratives qui participent à une dramaturgie singulière de l'espace et du temps scéniques.

Alors que le geste dansé se structure autour d'un canevas technique, l'improvisation de l'expression corporelle libère le danseur des cadres codifiés et

7. Maletic, Vera. *Body, space, expression : The development of Rudolf Laban's movement and dance concepts*. T. 75. Walter de Gruyter, 1987.

8. Graham, Martha. « Blood memory ». Dans : *New york* (1991).

invite le danseur à puiser directement dans son vécu sensoriel et émotionnel, réagissant à l'inattendu telles que la musique et les stimuli. Le corps devient dispositif de création instantanée. Steve Paxton[9] et la contact improvisation ont démontré comment l'écoute de la gravité et la réciprocité corporelle peuvent générer un langage corporel, sans partition fixe, où la subjectivité du danseur devient co-auteur d'une expression corporelle. L'expression corporelle donc naît de stimuli internes ou externes, et s'inscrit dans une logique de recherche émotionnelle et kinesthésique plutôt que formelle.

Entre création codifiée et improvisation, la technologie (capteurs, intelligence artificielle, réalité augmentée) offre un tiers-participant : elle traduit en temps réel la qualité du mouvement, génère rétroactions sonores ou visuelles, et crée un dialogue entre les danseur·ses et les machines. Cet intermédiaire technique modifie l'intention première, sollicite de nouvelles formes d'écoute et réoriente l'improvisation vers un échange dynamique avec le système. Plusieurs prototypes et installations illustrent cette émergence d'un langage commun, où la machine n'est plus simple miroir mais partenaire créatif.

9. Paxton, Steve. « Contact improvisation ». Dans : *The Drama Review* 19.1 (1975), p. 40-42.

## I.1.1 La création des gestes dansés

À la fin du XIX$^{e}$ siècle, pionnière de l'abstraction dansée, Loïe Fuller s'affranchit des codes classiques et introduit avec sa célèbre « Danse serpentine »[10], illustrée dans la Fig.I.1.1, un geste dansé qui ne repose ni sur la virtuosité technique ni sur la narration explicite, mais sur la transformation visuelle du corps en mouvement[11]. Elle crée une dynamique gestuelle fondée sur l'ondulation fluide de voiles de soie, mis en vibration par des extensions de bras dissimulées en utilisait des tiges en bambou, où le mouvement du textile devient le support principal de l'expression, illustrée dans la Fig.I.1.2. Le corps de la danseuse, partiellement dissimulé sous les larges pans de tissu, devient un support pour des effets visuels où la présence physique s'efface au profit d'une dynamique de formes mouvantes, évoquant des figures naturelles tellees que des papillons, des flammes ou des fleurs[12] [13].

En intégrant la lumière et la couleur comme éléments indissociables du mouvement, Fuller développe une esthétique du geste lumineux, où les déplacements corporels interagissent avec des projections chromatiques qui modulent la perception de la forme et de la dynamique du mouvement. Ce dispositif scénique, loin d'être uniquement technique, participe à la création du geste lui-même : chaque onde de tissu devient un prolongement perceptif du corps en mouvement, et chaque variation lumineuse influe sur le geste dansé. En dissolvant les frontières entre le corps et son environnement, entre le geste et son image projetée, Fuller préfigure des explorations sur la corporéité et la plasticité du mouvement qui marqueront la création de gestes dansés au XX$^{e}$ siècle.

Cette approche fait de Fuller une figure fondatrice de la danse moderne, en

10. La « Danse serpentine » de Loïe Fuller, faite de spirales et de volutes de voiles. Samuel Joshua Beckett, *Loïe Fuller Dancing*, vers 1900 © *Metropolitan Museum of Art/Gilman Collection, Purchase, Mrs. Walter Annenberg and The Annenberg Foundation Gift*, 2005.

11. « Pour sa danse serpentine, danse dématérialisée qui jette les bases de l'abstraction en danse, Loïe Fuller part de son propre corps pour développer une technique personnelle, fondée sur la mobilité du torse qui permet la puissance des mouvements des bras. ». URL: https://www.centrepompidou.fr/fr/pompidou-plus/magazine/article/loie-fuller-pionniere-de-labstraction-dansee

12. Sommer, Sally R. « Loie Fuller ». Dans : *The Drama Review* 19.1 (1975), p. 53-67, Gunning, Tom. « Loie fuller and the art of motion ». Dans : *La Decima Musa. Il cinema e le altre arti* (2001), p. 25-35.

13. URL:https://numeridanse.com/en/publication/loie-fuller-la-danse-des-couleurs-3/?playlist=69885



FIGURE I.1.1 – La « Danse serpentine » de Loïe Fuller. © Centre Pompidou.

valorisant une gestuelle libérée des conventions classiques et orientée vers l'exploration sensorielle et visuelle du mouvement. Sa contribution préfigure ainsi les évolutions chorégraphiques à venir, à la croisée de l'abstraction formelle, de l'expressivité visuelle et de l'émergence d'un langage corporel moderne.

Au début du XX$^{e}$ siècle, l'étude du geste dansé s'ouvre à l'élaboration d'un vocabulaire fondé sur des principes spatiaux, temporels et dynamiques. Une des figures majeures, Rudolf Laban, propose un système de description du mouvement [14]. Il commence dès les années 1920 à expérimenter des méthodes pour noter le mouvement, publiées notamment dans « Schrifttanz : Methodik, Orthographie, Eriauterungen » [15]. Par la suite, ses étudiants développent ses idées dans un cadre plus analytique, donnant naissance à la Laban Movement Analysis (LMA), un système qualitatif permettant de décomposer le mouvement en catégories telles que l'Espace, le Temps, le Poids et le Flux, afin d'en analyser la

14. LABAN, Rudolf, ULLMANN, Lisa. « The mastery of movement. » Dans : (1971), MALETIC, Vera. *Body, space, expression : The development of Rudolf Laban's movement and dance concepts*. T. 75. Walter de Gruyter, 1987.

15. LABAN, Rudolf. « Schrifttanz : Methodik, Orthographie, Eriauterungen ». Dans : *Vienna : Universal Edition* (1928).




FIGURE I.1.2 – Extensions de bras en utilisait des tiges en bambou. © https://shorturl.at/pOwPz

dynamique énergétique. Cette approche est approfondie par Irmgard Bartenieff et collaborateurs, dont les travaux relient les dynamiques qualitatives du mouvement (*Efforts*) aux formes spatiales qu'elles génèrent (*Shapes*)[16][17].

Plus récemment, en 2020, Christine Roquet renouvelle cette réflexion en considérant le geste dansé comme l'expression d'une corporéité structurée à la fois somatiquement, coordinativement, perceptivement et symboliquement, ce qui révèle la singularité de chaque expression corporelle. Elle introduit le concept de « perceptaction »[18], soulignant l'intrication des fonctions sensorielles (active/passive, focale/périphérique, inter- et parasensorielles) et met en lumière le rôle déterminant du pré-mouvement ou « disposition à agir » dans la genèse du geste. Par ailleurs, les outils d'analyse sont aujourd'hui complétés par des supports visuels et sonores (images et enregistrements). En outre, la notion d'Accordanse, développée dans des dispositifs mère-bébé et thérapeutiques, permet d'inscrire la

16. BARTENIEFF, Irmgard, LEWIS, Dori. *Body Movement : Coping with the Environment*. Routledge, 1980.
17. BARTENIEFF, Irmgard, DAVIS, Martha. *Effort-shape Analysis of Movement : The Unity of Expression and Function. By Irmgard Bartenieff, Martha Ann Davis*. Albert Einstein College of Medicine, Yeshiva University, 1965.
18. ROQUET, Christine. *Vu du geste : interpréter le mouvement dansé*. Centre national de la danse, 2020.

danse dans une circulation rythmique et énergétique entre les corps, comparable à une musicalité interne du geste.

Parallèlement au XX$^{e}$ siècle, l'architecture dramaturgique du geste s'affine avec Martha Graham, dont la pièce Lamentation (1930)[19] montre comment le mouvement devient un support narratif et expressif, posant les bases de la danse moderne américaine. Doris Humphrey, dans « The Art of Making Dances »[20], formalise la théorie de la *chute et récupération*, offrant une conceptualisation du rapport au sol, du poids et du rythme qui reste un pilier de l'enseignement chorégraphique. Au fil du XX$^{e}$ siècle, la chorégraphie a basculé d'un geste hautement codifié vers des formes d'expression corporelle libérées de toute codification stricte. Entre la création codifiée et l'expression libre, il convient de souligner la tension entre maîtrise technique et émergence spontanée : le geste dansé impose un canevas précis, tandis que l'expression corporelle invente ses propres règles au fil de l'instant. Là où le premier repose sur une partition de formes et de lignes, le second privilégie l'impulsion interne, l'écoute sensorielle et la réceptivité au hasard.

19. URL:https://marthagraham.org/portfolio-items/lamentation-1930/
20. Humphrey, Doris. « The art of making dances ». Dans : (1959).

## I.1.2 L'improvisation des expressions corporelles

À partir des années 1960, la postmodern dance a placé l'improvisation des expressions corporelles au centre de sa démarche : non seulement pour libérer le mouvement de toute narration linéaire ou émotion préétablie, mais aussi pour en faire un matériau processuel et sensoriel, rythmé par des dispositifs de hasard, de règles formelles minimales et de collaboration entre interprètes. Merce Cunningham[21], par exemple, inaugure la dissociation du geste et de la musique pour avoir introduit les *chance operations* (opérations de hasard) dans le processus chorégraphique. En lançant des pièces de monnaie ou en utilisant des tables de randomisation, il déterminait l'ordre des séquences, la durée des mouvements ou l'orientation spatiale des danseurs et danseuses, favorisant ainsi des combinaisons imprévues et stimulant une vigilance constante chez eux. En plus, le silence jouait un rôle actif : en créant des pièces sans musique ou en superposant danse et projection vidéo, Cunningham poussait les danseurs à redéfinir leur rapport au temps et à l'espace, à prendre appui sur le rythme interne de leur corps plutôt que sur une partition préétablie. Privés de bande son, chaque mouvement devenait une réponse improvisée aux variations de lumière, aux images projetées et aux silences eux mêmes, qui, loin d'être un simple vide sonore, participaient activement à l'émergence d'une musicalité propre au geste. Cette autonomie contraignait les danseurs à développer une écoute kinesthésique fine, à éprouver la densité et la texture du mouvement au rythme de leurs propres impulsions et à inventer à chaque instant un vocabulaire corporel.

En libérant ainsi le corps des conventions musicales et narratives, Cunningham créait un laboratoire d'exploration où le geste improvisé n'était plus subordonné à un canevas préétabli, mais dicté par la rencontre — toujours unique — entre les danseurs et danseuses et leur environnement visuel et silencieux. C'est dans cette liberté contrainte que réside l'un des apports majeurs de l'expression corporelle improvisée : la capacité à engendrer, sur le plateau, un espace de création partagé,

21. Brown, Carolyn. *Chance and circumstance : twenty years with Cage and Cunningham*. Knopf, 2009.



FIGURE I.1.3 – *Café Müller* © Pina Bausch Foundation(Ulli Weiss)

fondé sur l'instant présent, l'aléatoire et le dialogue imprévisible entre mouvement, lumière et absence de son.

Dans un autre registre, Pina Bausch renouvelle profondément la grammaire chorégraphique en l'ouvrant au théâtre [22] : le geste, au-delà de la technique, devient vecteur d'une charge psychologique, relationnelle et narrative. Comme elle le résumait elle-même : « Ce qui comptait pour elle n'était pas comment les gens bougent, mais ce qui fait bouger les gens » [23]. Son approche repose sur un travail

22. CLIMENHAGA, Royd. *Pina Bausch*. Routledge, 2008, CLIMENHAGA, Royd. *The Pina Bausch Sourcebook : The Making of Tanztheater*. Routledge, 2012, SERVOS, Norbert. « Pina Bausch : dance and emancipation ». Dans : *The Routledge Dance Studies Reader (London and New York : Routledge)* (1998), p. 36-45.

23. *Ich habe einmal gesagt : Mich interessiert nicht, wie die Menschen sich bewegen, sondern, was sie bewegt*.



FIGURE I.1.4 – *Nelken*, créé le 30 décembre 1982 à Wuppertal. © Opéra de Lille(Olivier Look)

d'improvisation mené avec les danseurs, à partir de questions personnelles, de souvenirs ou d'émotions, dans une recherche d'authenticité du mouvement. Ce processus crée une gestuelle fragmentée, expressive, souvent ancrée dans des situations de la vie quotidienne, où les corps révèlent leur vulnérabilité, leurs obsessions ou leurs désirs. Le langage chorégraphique devient alors un véritable théâtre des émotions, nourri par les expériences singulières des danseurs[24] [25]. Des œuvres emblématiques comme Café Müller (1978), où les danseurs se déplacent à l'aveugle dans un espace encombré de chaises, incarnent la solitude et la dépendance affective, ou Nelken (1982), dans laquelle les danseurs traversent un champ de fleurs tout en abordant des motifs de violence, de contrôle et de tendresse. Ces œuvres traduisent avec force sa capacité à faire émerger une vérité humaine à travers l'improvisation et l'intensité corporelle. Cette expressivité brute et cette intensité dramatique du théâtre dansé sont illustrées dans la Fig.I.1.3 et Fig.I.1.4.

En contrepoint, Anne Teresa De Keersmaeker explore davantage l'interaction

*Dieser Satz ist viel zitiert worden – er ist bis heute gültig.* URL: https://www.pinabausch.org/de/post/was-mich-bewegt

24. HOGHE, Raimund. « Pina Bausch : histoires de théâtre dansé ». Dans : *(No Title)* (1987).
25. LEPECKI, André. *Exhausting dance : Performance and the politics of movement*. Routledge, 2006.

entre structure musicale et geste dans *Fase (1983)*, à travers une répétition rigoureuse inspirée des compositions de Steve Reich. Plus récemment, Olga Moll et Makis Solomos ont proposé une réflexion complémentaire dans Gestes et mouvements à l'œuvre : une question danse musique, interrogeant les correspondances entre geste chorégraphique et processus musicaux aux XX$^{e}$ et XXI$^{e}$ siècles.

L'improvisation ne se limite donc pas à renverser les créations codifiées, elle invite davantage les danseurs à puiser dans leur expérience somatique et émotionnelle pour donner naissance à l'expression corporelle. La contact improvisation de Steve Paxton[26], par exemple, repose sur l'écoute partagée de la gravité et du toucher, générant un langage corporel co-créé dans l'instant. Les pionnières Isadora Duncan[27] et Mary Wigman[28] également ouvrent la voie à une danse biomécanique et expressive, en proposant des cadres souples où la subjectivité de chaque danseur devient moteur du mouvement. Dans ces pratiques, le geste se construit à la croisée des stimuli internes et externes, plaçant la recherche kinesthésique et l'attention sensorielle au cœur du processus créatif.

Ainsi se déploie, du début du XX$^{e}$ siècle à aujourd'hui, une riche diversité d'approches pour décrire, analyser et créer le geste dansé : des notations de Laban et Bartenieff aux dispositifs aléatoires de Cunningham, des fusions théâtre-danse de Pina Bausch aux croisements disciplinaires et interculturels qui nourrissent la création de l'expression corporelle. La transition du geste dansé vers l'expression corporelle passe par la suspension des cadres : le corps n'exécute plus un plan préétabli mais devient terrain d'exploration, et la relation à l'autre cesse d'être seulement le partage d'un vocabulaire pour devenir la co-création d'un flux relationnel. En filigrane, l'émergence des technologies participatives (capteurs, intelligence artificielle et réalité augmentée) instaure un troisième temps, où la machine traduit et module le geste dansé selon des logiques à la fois formelles et intuitives.

26. Paxton, Steve. « Contact improvisation ». Dans : *The Drama Review* 19.1 (1975), p. 40-42.
27. Duncan, Isadora. *My life*. Liveright, 2013.
28. URL : https://www.moma.org/interactives/exhibitions/2012/inventingabstraction/?work=238

## I.1.3 Vers la co-création homme-machine

Basée sur la phénoménologie de la perception[29] et des perspectives cognitives[30 31 32] qui lient perception et action, les artistes-chercheurs ont recentré leur attention sur les modalités d'interaction entre les corps humains et les systèmes numériques. Plutôt que de concevoir les systèmes comme de simples outils passifs soumis à la volonté de l'artiste, Michel Bret, Marie-Hélène Tramus et Edmond Couchot ont introduit la notion de « seconde interactivité »[33], fondée sur le concept de 'interaction comme transformation mutuelle' qu'ils développent depuis le début des années 1990. Ce terme décrit une évolution significative par rapport aux premières formes d'interactivité, généralement définies par des boucles stimulus-réponse directes, vers des systèmes plus complexes, adaptatifs et riches en comportements.

Comme Edmond Couchot et Marie-Hélène Tramus le soulignent, la seconde interactivité implique que le système soit capable d'interpréter des entrées sensorielles, de s'adapter dans le temps et de générer de manière autonome des réponses. Dans de tels dispositifs, le participant—qu'il soit spectateur, danseur ou acteur—entre dans un dialogue réciproque et évolutif avec un système artificiel dont le comportement n'est ni entièrement prédéterminé, ni aléatoire. La machine devient ainsi un agent créatif, capable de moduler ses sorties en temps réel à partir de retours sensorimoteurs. Ce déplacement pose les bases d'une esthétique relationnelle, où l'interactivité ne relève plus du contrôle mais de la co-constitution. En s'appuyant sur le concept d'esthétique relationnelle de Nicolas Bourriaud[34], l'œuvre numérique interactive est repensée comme un espace de coprésence, dans lequel la perception humaine et les processus machinaux se façonnent

29. Merleau-Ponty, Maurice. *Phénoménologie de la perception*. fr. Paris, France : Gallimard, mai 1976.
30. Berthoz, Alain. *Le sens du mouvement*. Odile Jacob, 1997.
31. Varela, Francisco J, Rosch, Eleanor, Thompson, Evan. *The Embodied Mind*. en. The MIT Press, sept. 1991.
32. Varela, Francisco J, Regnot, Franz. « Quel savoir pour l'éthique ? : action, sagesse et cognition ». Dans : (1996).
33. Tramus, M-H, Bret, M, Couchot, E. « La seconde interactivité ». Dans : *Arte e vida no século XXI, Tecnologia, ciência criatividade*. Sous la dir. de Brésil Unesp. 2004.
34. Bourriaud, Nicolas. *Relational aesthetics*. Les presses du réel, 2020.

mutuellement. Ici, le geste du spectateur n'est plus seulement un déclencheur, mais un geste-en-dialogue—un geste qui contribue à une performance dynamique et émergente.

Dans cette thèse, nous cherchons à approfondir cette réflexion en introduisant le concept d'« inter-actions » — avec un trait d'union — afin de mettre en lumière la notion d'actions autonomes et co-créatives émanant à la fois de l'humain et de la machine. Alors que la seconde interactivité met l'accent sur la capacité du système à répondre et à s'adapter, les inter-actions soulignent davantage une forme d'agency symbiotique, où les deux parties agissent non seulement en réaction, mais en résonance mutuelle. L'objectif n'est pas de simuler l'intelligence ni de reproduire le comportement humain dans les machines, mais d'explorer comment les gestes corporel incarné (la danse) et les processus computationnels (algorithmes, capteurs, systèmes réactifs) peuvent coproduire de l'affect et du rythme dans un champ performatif partagé.

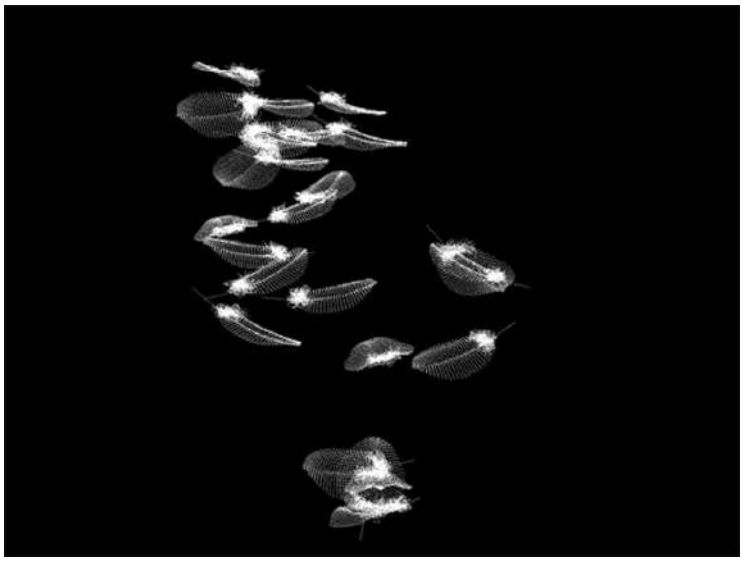


FIGURE I.1.5 – La Plume (1988), Edmond Couchot, Michel Bret et MarieHélène Tramus.

Plusieurs installations pionnières illustrent cette évolution relationnelle. Dans *La Plume* (1988)[35][36], créée par Edmond Couchot, Michel Bret et MarieHélène Tramus, le souffle du spectateur anime une plume virtuelle à l'écran, comme le montre la Fig.I.1.5. Cette interaction apparemment simple intègre la capture d'un

35. https://anyflo.com/applications/plume/plume.htm#french
36. https://www.centrepompidou.fr/fr/ressources/oeuvre/YIdgFIu

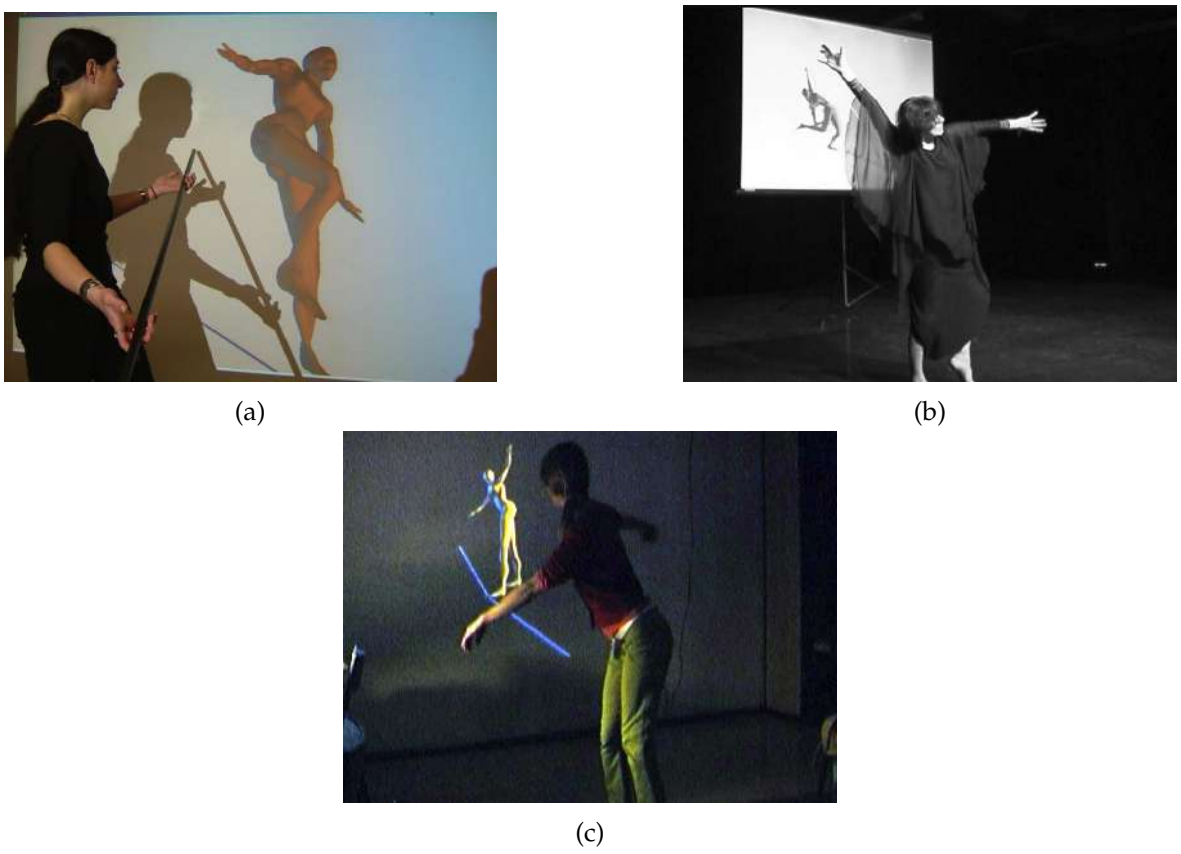


FIGURE I.1.6 – Le(s) Pissenlit(s) (1990-2005), Edmond Couchot.

signal biologique (via un microphone) à une animation en temps réel, générant un moment d'agency poétique où matière numérique et présence corporelle s'entrelacent. Dans *Les Pissenlits*[37][38], l'expiration du souffle déclenche à nouveau la dispersion des graines d'un pissenlit numérique—une interaction qui, pour moi, lors de ma première expérience en 2022 à l'exposition « Pour un imaginaire numérique avec Edmond Couchot »[39], est devenue un souvenir inoubliable brouillant la frontière entre mémoire sensorielle et comportement algorithmique, comme montrée la Fig.I.1.6.

Une autre œuvre illustrative est *La Funambule Virtuelle* (2001)[40][41], présentée Fig.I.1.7, développée par Michel Bret. Dans cette installation, le spectateur est invité à guider les mouvements d'un funambule numérique projeté à l'écran. La position et les gestes du participant sont captés en temps réel et interprétés par le système pour influencer l'équilibre, la direction et le comportement de l'avatar. Cependant, au lieu d'exécuter directement des commandes, le funambule agit selon un ensemble de règles comportementales autonomes—telles que la gestion de

37. https://www.centrepompidou.fr/fr/ressources/oeuvre/zbTLHpK
38. https://anyflo.com/applications/pissenlits/pissenlits_expo.htm#french
39. https://inrev.univ-paris8.fr/pour-un-imaginaire-numerique-avec-edmond-couchot
40. BRET, Michel, TRAMUS, Marie-Hélène, BERTHOZ, Alain. « Creation no. 2. La Funambule virtuelle, Michel Bret, Marie-Hélène Tramus, Alain Berthoz ». Dans : *Hybrid. Revue des arts et médiations humaines* 2 (2015).
41. https://www.archives-video.univ-paris8.fr/video.php?recordID=229



(a) (b)

(c)

FIGURE I.1.7 – La Funambule Virtuelle (2000-2006), Michel Bret et Marie−Hélène Tramus

l'équilibre et la résistance à la déstabilisation. Il en résulte une régulation partagée de l'action, où l'intervention du participant devient une force parmi d'autres au sein d'un système dynamique complexe.

Comme nous avons pu le voir avec l'exemple de La Funambule Virtuelle (2001) mentionné précédemment : le système informe en continu l'avatar des mouvements en temps réel du spectateur (via des capteurs), et les réactions de l'avatar influencent en retour le performeur humain — établissant ainsi un dialogue chorégraphique. Cela constitue un exemple de la manière dont les principes de la seconde interaction s'étendent naturellement à la performance en temps réel ou au spectacle vivant. Sur scène, l'objectif n'est plus simplement d'installer des dispositifs interactifs dans un espace, mais de créer une résonance vivante entre les performeurs humains et l'artificiel, qu'il soit virtuel ou physique. La scène devient un espace de co-constitution entre l'humain et la machine, illustrant la mise en œuvre dynamique de la seconde interactivité, où la forme de la

pièce évolue en temps réel selon les retours corporels. Dans leur article[42], les auteurs analysent en détail cette confrontation corps–machine et les phénomènes de mouvements en miroir qu'elle génère.

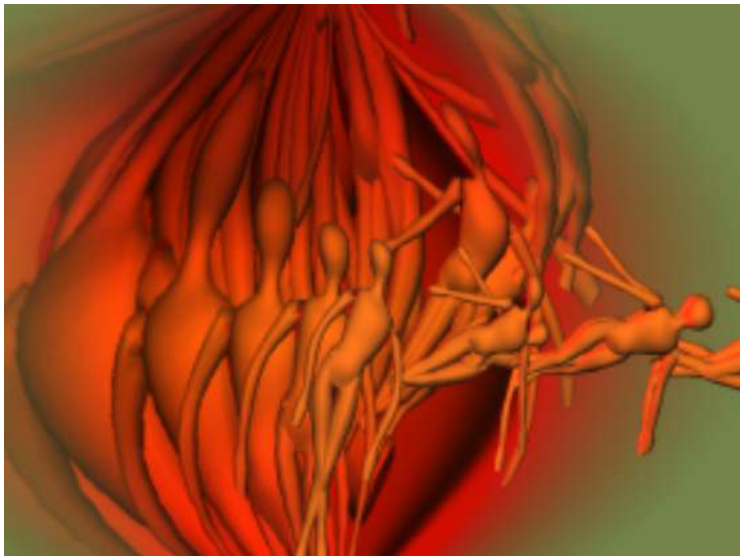


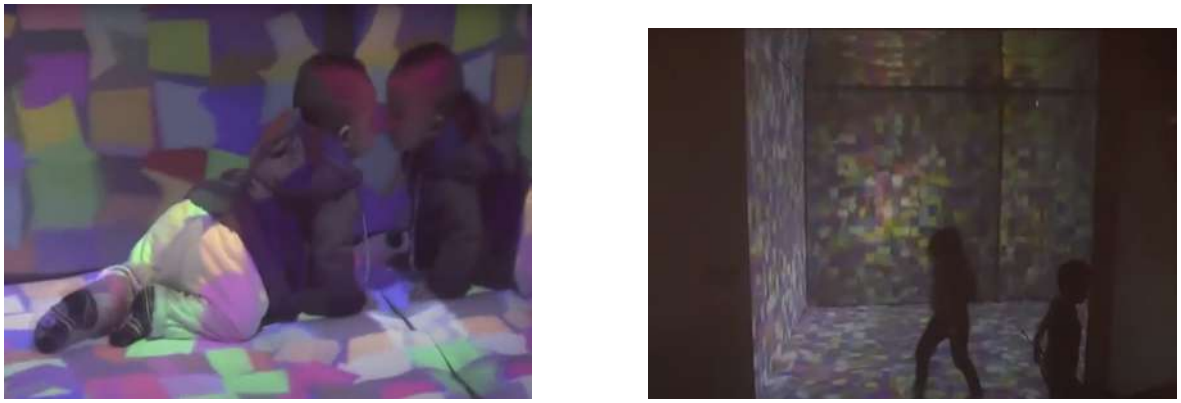
FIGURE I.1.8 – Pilobolus Virtuel (2020), Michel Bret et Marie–Hélène Tramus

Plus récemment, Pilobolus Virtuel (2020)[43],[44] a poursuivi une démarche similaire, rendant hommage à la compagnie de danse Pilobolus. L'installation multiplie les corps virtuels en mouvement : plusieurs figures de danseurs reliées s'animent selon des algorithmes. Selon la documentation de l'exposition, l'œuvre se compose de deux moments d'interactivité : l'un au niveau du créateur-programmeur, qui définit et calibre le système ; l'autre au niveau du spectateur (ou du performeur), qui interagit en temps réel avec le dispositif. Cette structure duale révèle une transition vers la seconde interactivité, où processus de création et expérience du public s'entremêlent, comme illustré dans la Fig.I.1.8.

Dans le domaine du spectacle vivant, les professionnels a également développé plusieurs outils scénographiques intégrant des avatars en temps réel sur scène aux côtés d'acteurs humains. Un exemple notable est AKN_Regie[45] développe par

42. BRET, Michel, TRAMUS, Marie-Hélène, BERTHOZ, Alain. « Interacting with an intelligent dancing figure : artistic experiments at the crossroads between art and cognitive science ». Dans : *Leonardo* 38.1 (2005), p. 46-53.
43. https://www.anyflo.com/applications/pilobolus/pilobolus.htm#francais
44. https://anyflo.com/applications/pilobolus/pilobolus.htm#eng_image
45. GAGNERÉ, Georges. « AKN_Regie : une passerelle entre arts numériques et spectacle vivant ». Dans : *Frontières numériques. Actes du 5ème colloque international sur les frontières numériques (2023)*. Europia. 2024, p. 272-282.

Georges Gagneré, un composant logiciel du framework AvatarStaging. Utilisant le langage de script visuel Blueprint dans Unreal Engine d'Epic Games, AKN_Regie fonctionne comme un plugin conçu pour être accessible aux artistes non programmeurs. Il permet de contrôler et de diriger en direct des avatars dans des spectacles mixtes, favorisant une coprésence entre la matérialité de l'acteur physique et la virtualité des avatars, contrôlés en temps réel par capture de mouvement ou via des logiciels d'animation spécifiques. Cette approche transforme le média numérique en un partenaire dynamique plutôt qu'en un simple décor, ouvrant ainsi la voie à de nouvelles formes d'écriture performative et de dramaturgie.



(a) (b)

FIGURE I.1.9 – C puissance C (2008), Chu-Yin CHEN

Un autre exemple est la mise en scène intéressante d'une installation créée par Chu-Yin CHEN : C puissance C (2008), présentée au Centre des Arts d'Enghien-les-Bains lors du festival Bains Numériques #3[46]. Dans *C puissance C*, les visiteurs pénètrent dans un grand cube rempli de nombreux petits cubes interactifs. Ces petits cubes réagissent à la présence et aux actions des participants : lorsqu'ils sont touchés ou approchés, ils changent de couleur et de mouvement, créant un environnement dynamique et psychédélique. Cette interaction provoque une réaction en chaîne, entraînant un mouvement exponentiel des cubes dans toute l'installation. Les participants voient leur propre image reflétée dans des miroirs

46. Bains Numériques sont une biennale internationale dédiée aux arts numériques, organisée par le Centre des Arts d'Enghien-les-Bains depuis 2005

disposés dans l'espace, les intégrant davantage à l'œuvre et brouillant la frontière entre observateur et participant, comme montré dans la Fig.I.1.9

À mesure que les systèmes interactifs transforment le spectateur en participant, le corps n'est plus simplement observé, mais activé et inscrit dans la dramaturgie. Ces œuvres créent différentes formes d'adresse et d'immersion. Par exemple, l'installation InterACTE (Batras, Guez, Jégo, Tramus, 2015)[47], présentée dans cette vidéo :

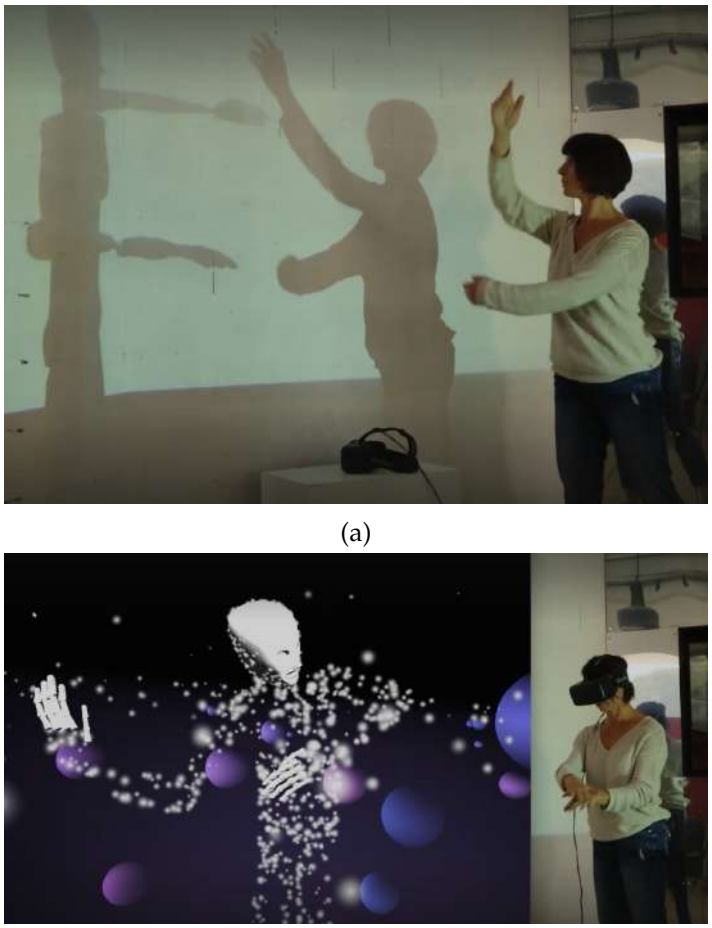
https://dai.ly/x3v086n

, propose aux visiteurs d'improviser un dialogue gestuel avec un personnage virtuel. L'utilisateur se tient face à une projection d'avatar : sa propre ombre interagit avec celle du personnage, comme montré dans la Fig.I.1.10a, ou, équipé d'un casque VR, le spectateur pénètre dans l'univers immersif de l'avatar, comme montré dans la Fig.I.1.10b

Ces stratégies technologiques — jeu d'ombres, immersion en VR — manifestent différentes manières d'engager le public avec les espaces virtuels. S'appuyant sur cette dynamique entre geste corporelle et machine, les improvisations chorégraphiques numériques prolongent le modèle du spectateur devenu performeur dans des environnements pleinement chorégraphiques. Dans des œuvres telles que EVE – Dance Is an Unplaceable Place (Margherita Bergamo Daniel González, 2018)[48], le participant habite littéralement le corps d'un danseur virtuel, ressentant ses paramètres sensoriels — le toucher, l'élan, les limites spatiales — et y répondant par des mouvements spontanés et non prémédités, comme montré das la Fig.I.1.11.

De même, DISCORDANCE (Unwired Dance Theatre, 2022–2023)[49] met en scène des danseurs à Londres et à New York, connectés en temps réel à des participants équipés de casques VR et à des spectateurs dans un théâtre à l'italienne, intégrant des flux de capture de mouvement en direct dans un monde virtuel partagé. Le public peut choisir son niveau d'immersion — assis dans l'auditorium, enfilant un

47. http://vracollective.com/fr/oeuvres/interacte/
48. https://www.youtube.com/watch?v=CNGUFis6dkE
49. https://www.unwireddancetheatre.com/discordance-live-mocap-and-vr



(a)

(b)

FIGURE I.1.10 – InterACTE(2015), Jégo Jean−François, Guez Judith, Batras Dimitrios et Marie−Hélène Tramus

casque fourni sur place, ou rejoignant à distance via son propre équipement VR ou un livestream — et interagir activement avec les performeurs grâce à la capture de mouvement, la télématique et le retour haptique, comme montré das la Fig.I.1.12. Dans chaque cas, l'improvisateur navigue dans une boucle de rétroaction cyber-chorégraphique[50] : chaque impulsion du membre induit une réaction du système virtuel ou haptique, qui sollicite à son tour de nouvelles réponses imprévues du corps.

50. En cyber-chorégraphie, « cyber » désigne la médiation technologique du mouvement : systèmes VR, capture de mouvement, haptiques et environnements en réseau jouent tous un rôle dans la structuration de l'interaction. Dans ce contexte, le mouvement fait partie d'un système interactif, et non d'une simple séquence exécutée. Les gestes du danseur déclenchent des réponses numériques, qui à leur tour influencent de nouveaux mouvements.



(a)



(b)

FIGURE I.1.11 – EVE – Dance Is an Unplaceable Place. © https://www.youtube.com/watch?v=CNGUFis6dkE



(a)



(b)

FIGURE I.1.12 – DISCORDANCE (Unwired Dance Theatre, 2022–2023). © https://www.unwireddancetheatre.com/discordance-live-mocap-and-vr

# Chapitre I.2

# Les robots dans la performance dansée

## Introduction

Dans le spectacle vivant, la plupart des créations relèvent de l'expérimentation artistique, se distinguant ainsi des formats événementiels centrés sur le divertissement, tels que les concerts. Contrairement aux productions concertiques, qui privilégient la mise en scène lumineuse et la virtuosité technique, les spectacles vivants adoptent une approche dramaturgique intégrée. Cette démarche influe à la fois sur la structuration du mouvement et de la gestuelle scénique, ainsi que sur l'articulation narrative de la performance. L'expérience spectatorielle ne se limite donc pas à une réception sensorielle immédiate (visuelle ou auditive), mais s'ouvre à une exploration perceptive et cognitive, engageant le public dans une interaction interprétative où l'innovation formelle et conceptuelle occupe une place centrale.

Lorsque des technologies avancées, notamment la robotique, sont intégrées au spectacle vivant, elles révèlent une tension entre l'expression artistique et les impératifs technologiques. Cette tension provient du fait que le développement des robots a d'abord été orienté vers des fonctions utilitaires. Par exemple, les robots humanoïdes sont apparus comme une évolution logique après les bras robotiques et les robots quadrupèdes, leur conception étant initialement motivée par des applications industrielles, militaires ou l'automatisation des usines. Ils n'ont donc pas été pensés dès l'origine pour la danse ou le mouvement artistique. Ainsi, les

performances impliquant des robots dans des interactions avec la musique ou la danse émanent souvent d'initiatives individuelles – chercheurs, artistes ou metteurs en scène – plutôt que d'un programme structuré de recherche artistique à long terme.

Cela explique pourquoi la majorité des performances dansée robotique manquent de continuité ou d'un cadre de recherche soutenu. Par exemple, la performance de 2007 impliquant le robot humanoïde HRP-4C[51] aux côtés de danseurs en synchronisation chorégraphique, ou celle de World Expo de 2010 à Shanghai, où 20 robots NAO ont exécuté une danse synchronisée sur le Boléro de Ravel, étaient principalement conçues comme des démonstrations ponctuelles. Bien que techniquement impressionnants, ces projets étaient limités dans leur portée de création artistique en raison de ressources humaines et d'un manque de soutien à la recherche en arts vivants.

Les performances intégrant de l'expérimentation très artistique exigent un investissement conséquent en moyens financiers, humains et en réflexion artistique, qui impose une barrière d'entrée élevée. C'est pourquoi les chorégraphes et metteurs en scène qui explorent l'intégration de la robotique travaillent généralement avec des robots de taille petite et des robots bras, comme NAO — un robot humanoïde de 58 cm de haut — ou avec des bras robotiques. Parmi les exemples, nous pourrons citer le projet ArTec 2023 « Scène et robotique : interactions et interrelations »[52], qui mettait en scène NAO dans un contexte théâtral, ainsi que la performance de 2015 Huang Yi & KUKA au 3LD Art & Technology Center à New York[53], où le bras robotique KUKA interagissait avec des danseurs.

L'une des rares occurrences où un robot humanoïde de taille humaine[54] a été intégré à une l'expérimentation artistiques est la collaboration de 2012 entre Tayeb

51. Kaneko, Kenji et al. « Cybernetic human HRP-4C ». Dans : *2009 9th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*. IEEE. 2009, p. 7-14.

52. EUR ArTeC, *RobotAct : une conférence-spectacle sur la co-création humain-robot*, EUR ArTeC, [Online]. Available : https://eur-artec.fr/evenements/robotact-une-conference-spectacle-sur-la-co-creation-humain-robot/

53. https://tccny.moc.gov.tw/News_Content.aspx?n=769&s=22618

54. Les robots de taille humaine ont généralement une hauteur comprise entre environ 1,2 mètre et 1,8 mètre

Benamara et HRP-2[55]. Toutefois, les enjeux étaient apparents durant la performance : les limites technologiques étaient perceptibles, car un ingénieur devait rester sur scène pour surveiller et protéger le robot, comme l'illustre cette vidéo : https://www.youtube.com/watch?v=Ux7yDhHaFy8&list=PL-aDZFPp-H_1N-Qj1HldHTasRVBsS0Xq2.

Les robots humanoïdes de taille humaine, tels que HRP-2 et ses successeurs, HRP-4, ou encore des modèles plus récentes comme Atlas[56] de Boston Dynamics, posent des défis considérables en raison de leur complexité. Jusqu'à présent, ces robots ont été traitées comme les perles des laboratoires de recherche, souvent limitées à un ou quelques exemplaires de robots humanoïdes de taille humaine au sein d'une même institution. Elles sont principalement mobilisées pour des démonstrations expérimentales ou des projets scientifiques, et leur introduction dans des performances artistiques de spectacle vivant pose des enjeux considérables : au lieu d'une simple démonstration commerciale, tout dommage durant la performance pourrait compromettre leur fonctionnement, affectant ainsi les axes de recherche du laboratoire et la pérennité des financements. Sous le soutien de l'EUR ArTeC, le projet Co-évolution, Co-création et improvisation Homme-Machine (CECCI-H2M) a offert un terrain de jeu expérimental idéal pour explorer des interactions entre robots humanoïdes de taille humaine et notre corps vivant. Cette initiative a permis d'aborder les défis techniques liés à leur intégration dans des performances artistiques chorégraphiques, en cherchant à dépasser les limites, à la fois ingénierie et artistiques.

55. Ramos, Oscar E et al. « Dancing humanoid robots : Systematic use of osid to compute dynamically consistent movements following a motion capture pattern ». Dans : *IEEE Robotics & Automation Magazine* 22.4 (2015), p. 16-26.

56. https://bostondynamics.com/atlas/

### I.2.1 Typologie des robots scéniques

Si l'on parcourt le siècle écoulé, on constate que les robots non humanoïdes comme humanoïdes se sont rapidement développés et ont souvent joué un rôle clé pour répondre aux besoins industriels ; parallèlement, ils ont également attiré l'attention des metteurs en scène et des chorégraphes, désireux de créer de nouveaux vocabulaires et de nouvelles formes de performance, au-delà de l'invention de dispositifs lumineux, sonores ou mécaniques sur scène. Nous proposons ici un panorama des performances artistiques impliquant différents types de robots, afin de mettre en lumière l'intérêt particulier de créer avec des robots humanoïdes de taille humaine, tels que le HRP-4.



FIGURE I.2.1 – Le robot humanoïde HRP-4. © https://robotsguide.com/robots/hrp4

#### I.2.1.1 Les robots non-humanoïdes

Au milieu du XX$^{e}$ siècle, les robots non humanoïdes ont d'abord émergé pour satisfaire des objectifs industriels et militaires, mais ils ont vite suscité la curiosité d'artistes et de chorégraphes en quête d'outils inédits. L'un des tout premiers

exemples est la « *tortoise* » de Grey Walter (1948)[57], petite machine à roues dotée de capteurs photoélectriques rudimentaires, se déplaçant de manière autonome et réagissant à la lumière. Dépourvue de toute forme anthropomorphe, elle jeta toutefois les bases de l'art cybernétique. Peu après, en 1954, George Devol inventa le Unimate, premier bras robotique programmable, commercialisé dans les années 1960 par la société Unimation[58], révolutionnant l'industrie par l'automatisation de tâches telles que le soudage et la manutention. C'est également à cette période que le terme « robotique » s'est progressivement imposé à travers, notamment, les célèbres Trois lois de la robotique d'Isaac Asimov(1950) :

> Un robot ne peut porter atteinte à un être humain ni, restant passif, laisser cet être humain exposé au danger
> Un robot doit obéir aux ordres donnés par les êtres humains, sauf si de tels ordres entrent en contradiction avec la première loi
> Un robot doit protéger son existence dans la mesure où cette protection n'entre pas en contradiction avec la première ou la deuxième loi[59]
>
> — Asimov Isaac. « I, Robot ». Gnome Press (1950)[60][61]

Désormais, la robotique ne se limitait plus à l'introduction de l'automatisation en industrie, mais suscitait aussi des réflexions éthiques. Les premières expérimentations artistiques s'orientèrent donc vers la réactivité environnementale et la cybernétique.

Dans les années 1970–1980, avec l'amélioration des capteurs et des systèmes de contrôle, des robots tels que le Stanford Arm (1969) et le PUMA (1978), illustrés en Fig.I.2.2a,I.2.2b, devinrent des piliers de la production automobile et électronique. Conçus pour la soudure et la manutention, ces manipulateurs démontraient déjà des mouvements programmables de plus en plus précis, technologies qui

57. https://americanhistory.si.edu/collections/object/nmah_879329
58. https://www.youtube.com/watch?v=-Xl2c91pWGc
59. « First Law : A robot may not injure a human being or, through inaction, allow a human being to come to harm. Second Law : A robot must obey the orders given it by human beings except where such orders would conflict with the First Law. Third Law : A robot must protect its own existence as long as such protection does not conflict with the First or Second Law. »
60. Asimov, Isaac. « Runaround ». Dans : *Astounding science fiction* 29.1 (1942), p. 94-103.
61. Asimov, Isaac. *I, robot*. T. 1. Spectra, 2004.



(a) Stanford Arm (1969). © https://en.wikipedia.org/wiki/Stanford_arm




(b) Puma (1978). ©[a]

a. Gasparetto, Allesandro, Scalera, Lorenzo. « From the unimate to the delta robot : the early decades of industrial robotics ». Dans : *Explorations in the History and Heritage of Machines and Mechanisms : Proceedings of the 2018 HMM IFToMM Symposium on History of Machines and Mechanisms*. Springer. 2019, p. 284-295.

Figure I.2.2 – Le Stanford Arm (1969) et le PUMA (1978).

influencèrent ensuite les moteurs et actionneurs disponibles pour les artistes. Simultanément, des engins d'exploration robotique comme les atterrisseurs Viking sur Mars (1968–1983) et le Canadarm (d'abord utilisé lors de la mission STS-2 en 1981), montrèrent au public les capacités de mécanismes non humanoïdes opérant à distance, dans des environnements extrêmes. À la fin du XX$^{e}$ siècle, les robots non humanoïdes se diversifièrent en rovers (par exemple Sojourner[62], 1996) et en systèmes chirurgical-biomécaniques (le Da Vinci Surgical System[63], 2000), révolutionnant le soin médical par une précision inédite.

Si ces robots industriels et scientifiques n'étaient pas conçus pour la scène ou la danse, leurs moteurs, capteurs et bibliothèques logicielles abaissèrent considérablement la barrière d'entrée pour les artistes. Dès le début du XXI siècle, les briques technologiques (actuation précise, capteurs réactifs, logiciels modulaires) devinrent suffisamment accessibles pour que chorégraphes et

62. Wilcox, Brian, Nguyen, Tam. *Sojourner on mars and lessons learned for future planetary rovers*. Rapp. tech. SAE Technical Paper, 1998.

63. Surgical, Intuitive. « da Vinci. Surgical System ». Dans : *http ://www. intusurg. com/html/davinci. html* (2013).

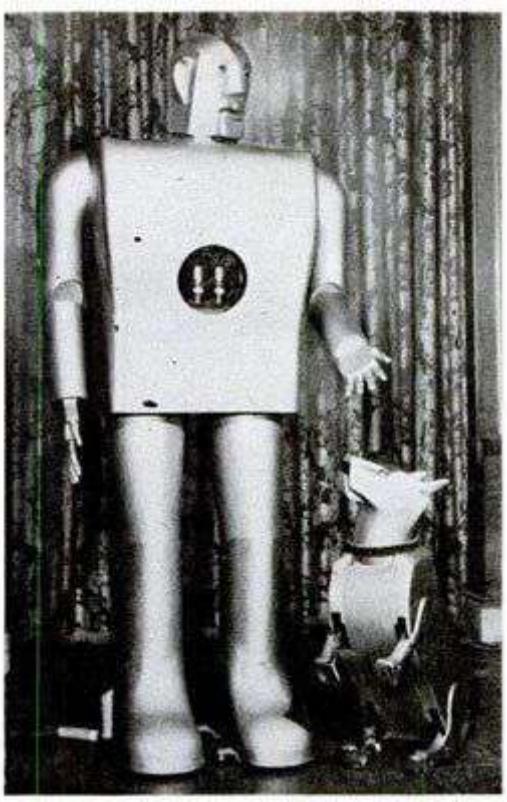


FIGURE I.2.3 – Elektro de Westinghouse (1937). © https://themansfieldmuseum.org/elektro/

scénographes considèrent les machines non anthropomorphes non seulement comme curiosités, mais comme de véritables partenaires créatifs.

### I.2.1.2 Les robots humanoïdes

Parallèlement, le concept de robot humanoïde évolua — d'abord sous forme de prototypes inspirés de la science-fiction, puis grâce à des recherches dédiées. Elektro [64], présenté par Westinghouse à l'Exposition universelle de New York en 1939 (Fig.I.2.3), fut l'un des premiers humanoïdes emblématiques : mesurant plus de deux mètres, il parlait une quarantaine de mots, bougeait les bras et simulait des tâches simples, suscitant l'émerveillement. En 1973, l'université Waseda (Japon) développa le WABOT-1 (Fig.I.2.4), premier humanoïde de taille humaine capable de marcher et de saisir des objets, jetant les bases des robots tels qu'ASIMO (Honda, 2000) ou Atlas (Boston Dynamics, 2013), Fig.I.2.5a et Fig.I.2.7a. Pour autant, la création artistique robotique progressa peu à cette époque. Edmond Couchot l'explique ainsi :

64. https://www.youtube.com/watch?v=a3o6JJTpTzk

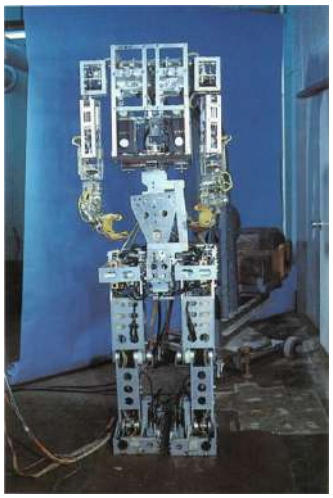


FIGURE I.2.4 – WABOT-1 de l'Université Waseda (1973). © https://www.humanoid.waseda.ac.jp/booklet/kato_2.html

> [. . . ] Les robots-danseurs ne réapparurent que beaucoup plus tard, aux alentours des années 2000. L'existence de ce fossé a deux explications. La première est que les robots capables de véritablement danser et de réagir aux comportements d'autres danseurs ou de danser en solo n'apparurent que beaucoup plus tard, [. . . ]. La robotique nécessitait ensuite des compétences très spécifiques de la part de l'artiste, s'il travaillait seul ou en collaboration étroite avec des ingénieurs, ainsi qu'un investissement matériel coûteux.
>
> — Edmond couchot. « Automates, robots et humains virtuels ». chapitre 9 (2022) [65]

Si l'on considère uniquement le coût humain et budgétaire, créer une performance dansée avec robot était nettement plus lourd qu'une chorégraphie utilisant des technologies facilement accessibles (capture de mouvement, projection vidéo, logiciels divers). Toutefois, l'accessibilité des robots — humanoïdes ou non — s'est significativement démocratisée à cheval entre fin du XX et début du XXI siècle.

Dès 2000, les humanoïdes de taille humaine montrèrent leur faisabilité auprès du grand public : ASIMO (Honda, 2000) démontra la locomotion bipède et une

65. COUCHOT, Edmond. *Automates, robots et humains virtuels dans les arts vivants*. Presses universitaires de Vincennes, 2022.




(a) ASIMO de Honda (2000). © https://robotsguide.com/robots/asimo



(b) HRP-2 Promet (2002). © https://robotsguide.com/robots/hrp2



(c) HRP-3 (2007). © https://global.kawasaki.com/en/corp/newsroom/news/detail/ba_c3070621-1.html



(d) HRP-4C Ucroa (2009). © https://robotsguide.com/robots/hrp4c



(e) HRP-4 (2010). © https://robotsguide.com/robots/hrp4

FIGURE I.2.5 – les robots humanoïdes de taille humaine dans les années 2000-2010

interaction homme-machine rudimentaire, tandis que Kawada Robotics, en collaboration avec l'AIST, dévoila successivement HRP-2 Promet (2002), HRP-3 (2007)[66], HRP-4C Ucroa (2009)[67] et HRP-4 (2010), illustrés dans la Fig.I.2.5a,I.2.5b,I.2.5c,I.2.5d,I.2.5e, chacun gagnant en fluidité et en articulation. Par ailleurs, Nao, conçu par Aldebaran Robotics (France, 2007) et illustré en Fig.I.2.6, devint un standard : haut de 58cm, 4kg, équipé de caméras, microphones, capteurs et connecté à Internet, il offre 25 degrés de liberté pour marcher, parler, reconnaître la voix, saisir des objets et interagir.



FIGURE I.2.6 – Nao de Aldebaran Robotics (2008). © https://us.softbankrobotics.com/nao

Les premières années 2010 virent émerger d'autres humanoïdes grandeur nature : Atlas (Boston Dynamics, 2013) et Kosaka (Speecys, 2017) exécutèrent des acrobaties dynamiques ; en 2022, Optimus-Gen (Bumblebee) (Tesla) et GR-1 (FOURIER-Robotics) repoussèrent l'expressivité, illustrés dans la Fig.I.2.7a,I.2.7b,I.2.7c,I.2.7d,I.2.7f ; enfin, en 2023, Unitree H1 dansa un Yangge folklorique motorisé lors du Gala du Nouvel An chinois[68] (Fig.I.2.7e). Chacun de

66. KANEKO, Kenji et al. « Humanoid robot HRP-3 ». Dans : *2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. IEEE. 2008, p. 2471-2478.
67. KAJITA, Shuuji et al. « Cybernetic human hrp-4c : A humanoid robot with human-like proportions ». Dans : *Robotics Research : The 14th International Symposium ISRR*. Springer. 2011, p. 301-314.
68. https://www.youtube.com/watch?v=Fw_dSNxhhY4

ces modèles offrait aux chorégraphes un éventail toujours plus riche de capacités de mouvement.



(a) Atlas de Boston Dynamics (2013). © https://en.wikipedia.org/wiki/Atlas_(robot)



(b) le Kosaka (2017). © https://www.youtube.com/watch?v=OgMXanULyRk&t=1s



(c) Bumblebee de Tesla (2022). © https://www.youtube.com/watch?v=cpraXaw7dyc(0:02)



(d) GR-1 de FOURIER-Robotics (2022). © https://www.fftai.com/products-gr1




(e) H1 de Unitree Robotics (2023). © Unitree



(f) G1 de Unitree Robotics (2024). © https://www.unitree.com/cn/g1

FIGURE I.2.7 – les robots humanoïdes de taille humaine de 2010 jusqu'à présent

## I.2.2 Les performances robotiques

### I.2.2.1 Démonstrations purement robotiques

L'usage des robots non humanoïdes et humanoïdes prit souvent la forme de démonstrations techniques — vitrines de mouvements programmés plutôt que de véritables créations artistiques. Ainsi, à l'Expo universelle de Shanghai (2010), vingt robots NAO exécutèrent une chorégraphie de huit minutes, parfaitement synchronisée sur le Boléro de Ravel, illustrant la robustesse des NAO et leur coordination à grande échelle (Fig.I.2.8)[69]. Simultanément, à la Digital Content Expo 2010, HRP-4C effectua une danse préprogrammée aux côtés de quatre danseurs humains, créée par Masaru Ishikawa et le chorégraphe SAM, à partir de mouvements générés et édités par le logiciel Choreonoid (AIST)[70]. HRP-4C y chante avec une voix synthétique et mime les expressions humaines pour démontrer comment un humanoïde de taille réelle peut produire un mouvement fluide et vivant dans un scénario prédéterminé.



FIGURE I.2.8 – Expo universelle de Shanghai (2010), vingt robots NAO exécutèrent une chorégraphie.

69. https://www.youtube.com/watch?v=4t1NWH6G1f0&list=PL-aDZFPp-H_1N-Qj1HldHTasRVBsS0Xq2&index=2

70. NAKAOKA, Shin'ichiro. « Choreonoid : Extensible virtual robot environment built on an integrated GUI framework ». Dans : *2012 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII)*. IEEE. 2012, p. 79-85.

Un peu plus tard, lors du D.LEAGUE 2021–22 Championship au Tokyo Garden Theater, huit robots Pepper réalisèrent une danse synchronisée en ouverture, célébrant leur huitième anniversaire. La chorégraphie, adaptée à leurs bras articulés et à leurs LED expressives, offrit un spectacle hip-hop tout en soulignant le potentiel de Pepper comme plateforme de divertissement[71] [72].

Ces démonstrations retombent généralement dans la catégorie *show robotique*, exécutées typiquement dans des scénarios prédéterminés : par exemple, en dansant en position suspendue[73], en réalisant des mouvements synchronisés avec un groupe de robots[74], en respectant strictement le rythme musical[75] ou en imitant les mouvements de danse humaine[76]. Ces performances soulignent à la fois le potentiel des robots à s'impliquer davantage dans la création artistique avec des chorégraphes professionnels et les limites qu'ils rencontrent sur scène, qu'ils soient anthropomorphiques ou non. Elles montrent également que leur capacité à participer à une véritable co-création artistique en danse contemporaine reste encore largement sous-exploitée.

### I.2.2.2 Performances homme–robot

En 1956, Nicolas Schöffer conçut CYSP-1, sculpture métallique sur roulettes équipée de capteurs photoélectriques et d'un microphone, illustrés dans la Fig.I.2.9. CYSP-1 réagissait à la lumière et au son : la lumière bleue l'excitait, le rouge le calmait, le silence déclenchait des mouvements imprévisibles. Dépourvu de mémoire ou d'autonomie réelle, ses réactions paraissaient organiques. Présenté au théâtre Sarah-Bernhardt puis dans un ballet de Maurice Béjart, CYSP-1 joua le rôle d'un robot danseur non anthropomorphe, totem abstrait autour duquel évoluaient les danseurs — faisant de lui le premier automate à danser avec des humains.

71. https://www.softbank.jp/en/sbnews/entry/20220610_01
72. https://www.youtube.com/watch?v=OoGT2vU6p0w
73. https://www.youtube.com/watch?v=OgMXanULyRk
74. https://www.youtube.com/watch?v=EoLhOnQNDCo
75. https://www.youtube.com/watch?v=fn3KWM1kuAw&t=18s'https://www.youtube.com/watch?v=cpraXaw7dyc&t=3s
76. Nakaoka, Shin'ichiro et al. « Learning from observation paradigm : Leg task models for enabling a biped humanoid robot to imitate human dances ». Dans : *The International Journal of Robotics Research* 26.8 (2007), p. 829-844.

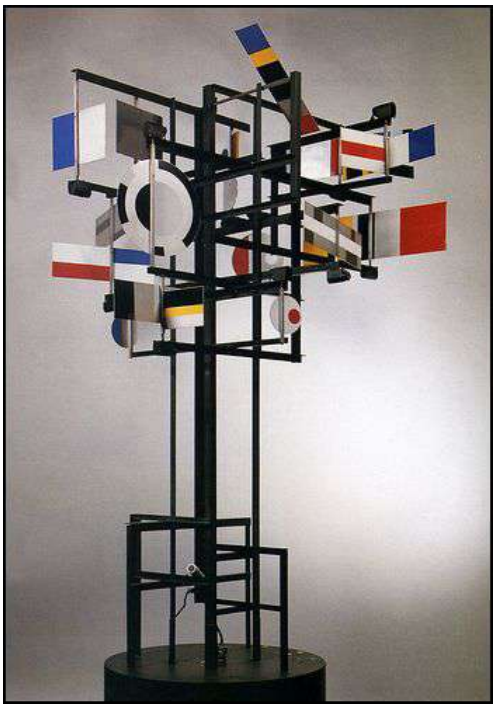


FIGURE I.2.9 – CYSP-1 de Nicolas Schöffer. © https://cyberneticzoo.com/cyberneticanimals/1956-cysp-1-nicolas-schoffer-hungarianfrench/

Les collaborations interactives, en temps réel, restèrent rares jusqu'aux années 2010. Le ballet de Béjart annonçait la chose, mais l'absence de capteurs temps réel limitait l'interaction.

Décennies plus tard, inspirée par Nao, la chorégraphe espagnole Blanca Li créa Robot, ballet associant danseurs humains et sept robots Nao. Après plusieurs années de développement, la pièce fut finalement présentée en 2013 au Festival Montpellier Danse[77]. Les robots suivaient des séquences préenregistrées et répondaient à des déclencheurs simples (cues lumineux), mais l'illusion d'un jeu interactif représenta un jalon majeur.

En 2012, à Toulouse, lors de la soirée des Novélisés à la Halle aux Grains, le danseur hip-hop Tayeb Benamara évolua aux côtés de HRP-2, illustrés dans la Fig.I.2.10. À partir de données de capture de mouvement, le robot HRP-2 danse avec Tayeb Benamara, danseur de hip-hop, en suivant des motifs de capture de mouvement sur la musique du human juke-box d'Ange B, démontrant qu'un humanoïde taille humaine peut approcher et reproduire des mouvements humains complexes via la préprogrammation.

77. https://www.blancali.fr/fr/event/99/Robot

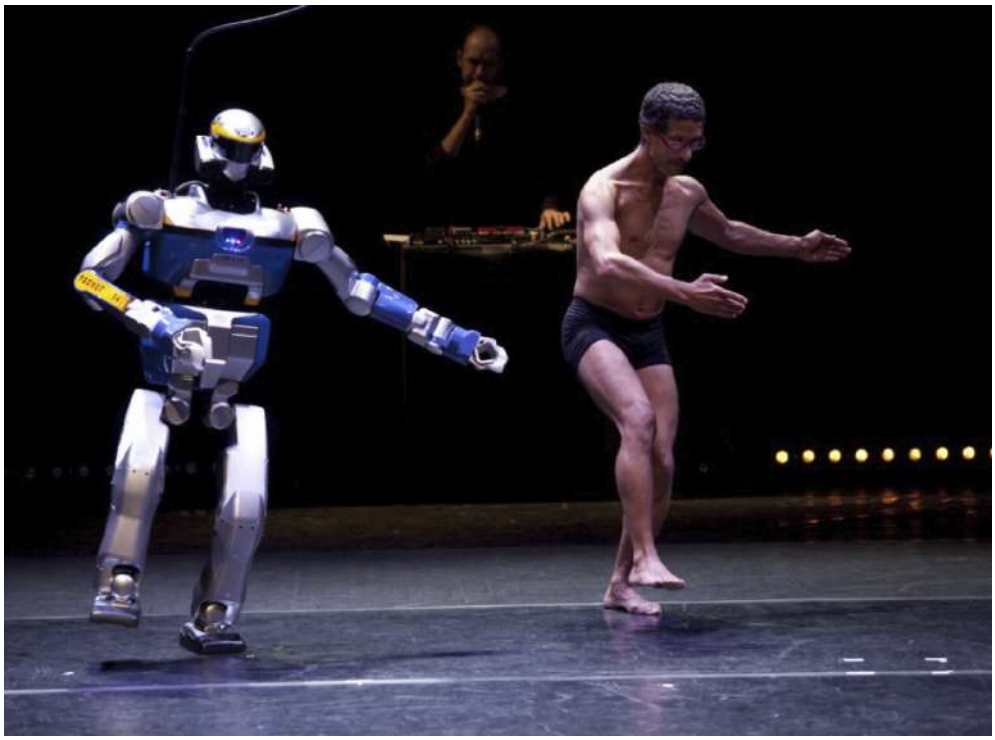


FIGURE I.2.10 – Une chorégraphie du robot HRP-2 et le danseur Tayeb Benamara. © Frédéric Maligne

En 2015, la chorégraphe Huang Yi collabora avec un robot industriel KUKA au 3-Legged Dog Art & Technology Center de New York. Dans *Huang Yi & KUKA*, le robot et la danseuse enchaînèrent des duos synchrones, alternant miroirs et désynchronisations délibérées — fruit de mois de programmation pour capturer la précision et la fluidité de l'humain et de la machine, illustrés dans la Fig.I.2.11.

En décembre 2020, Boston Dynamics diffusa une vidéo de ses humanoïdes Atlas, accompagnés de Spot et Handle, dansant sur « Do You Love Me ? » des Contours. Les routines, entre changements de forme coordonnés et acrobaties minutieuses, révélèrent l'agilité, l'équilibre et le contrôle dynamique d'Atlas, grâce à une étroite collaboration chorégraphes-ingénieurs. Monica Thomas en signa les séquences, traduisant la danse en mouvements robotiques, avant que les équipes de Boston Dynamics n'adaptent ces gestes aux contraintes mécaniques de chaque modèle[78]. En mars 2025, Boston Dynamics a diffusé une nouvelle vidéo illustrant l'intégration par Atlas de l'apprentissage par renforcement et des données de capture de mouvement pour effectuer des manœuvres de style

78. https://dancemagazine.com/boston-dynamics-dancing-robots/#gsc.tab=0



FIGURE I.2.11 – HUANG Yi & KUKA se produisent lors de TED2017. © Bret Hartman / TED

breakdance—poiriers, roulades, saltos arrière et une rotation des jambes appelée « moulin à café ». Contrairement aux démonstrations précédentes, ces mouvements ont été le résultat de plus de 150 millions d'exécutions de formation basées sur simulateur, permettant à Atlas de transférer le mouvement capturé humain dans ses politiques de contrôle sans direction humaine explicite à l'exécution. Le résultat est un humanoïde capable d'exécuter des acrobaties complexes, impliquant tout le corps, avec une fluidité sans précédent, marquant une avancée significative dans la performance robotique autonome et apprise. Vidéo montrée dans https://www.youtube.com/watch?v=I44_zbEwz_w.

Un autre exemple montre le potentiel interdisciplinaire de la performance humain-robot : EUR ArTeC « Scène et robotique : interactions et interrelations » (2021-2023, où les robots NAO interagissaient avec des acteurs et des danseurs dans des scènes semi-improvisées. L'objectif était d'explorer le potentiel dramaturge des robots — en testant comment les indices non verbaux, le timing et les dynamiques spatiales pourraient favoriser de nouvelles formes narratives sur scène. Ces explorations collaboratives ont culminé dans RobotAct (septembre 2023, Théâtre aux Mains Nues, Paris), une « conférence-performance » où NAO a partagé la

scène avec des chercheurs et des artistes humains, mettant en lumière les défis de l'intégration d'agents robotiques dans le récit théâtral.

À l'ère des années 2020, avec l'augmentation de l'accessibilité de la robotique au public et sous le soutien de l'EUR ArTec, le projet Co-évolution, Co-création et improvisation Homme-Machine (CECCI-H2M) a offert un terrain expérimental idéal pour les chercheurs afin d'explorer l'intégration de robots humanoïdes de taille humaine dans des performances artistiques dans le contexte du mouvement de danse et d'essayer de relever les défis, à la fois d'ingénierie mais aussi artistiques. En plus de la performance de danse que nous avons vue dans les années 2010/2020, nous avons choisi d'explorer les possibilités de créer une performance artistique avec un robot humanoïde de taille réelle, le HRP-4, nous donnant plus de défis et ouvrant des perspectives humain-humanoïde-robot à discuter des phénomènes qui émergent lorsque le robot interagit avec le danseur sur scène en temps réel. Et surtout, nous avons l'intention de moduler et d'ouvrir les outils développés afin d'augmenter l'accessibilité des ressources et d'aider les artistes à pouvoir co-créer avec ces machines plus facilement.

| **Nom du robot (créateur)** | **Année** | **Court résumé** |
|---|---|---|
| Elektro (Westinghouse) | 1939 | L'un des premiers humanoïdes : pouvait parler, bouger ses bras et effectuer des gestes simples. |
| Tortoise (Grey Walter) | 1948 | Petit robot non-humanoïde muni de capteurs photoélectriques, réagissant à la lumière ; pionnier de l'art cybernétique. |
| Unimate (George Devol / Unimation) | 1954 | Premier bras robotique programmable, introduit dans l'industrie automobile pour des tâches automatisées. |
| CYSP1 (Nicolas Schöffer) | 1956 | Sculpture robotique interactive réagissant à la lumière et au son, intégrée à des ballets humains. |
| Stanford Arm (Victor Scheinman) | 1969 | Bras robotique non-humanoïde de haute précision, utilisé dans l'industrie et la recherche. |
| WABOT-1 (Waseda University) | 1973 | Premier humanoïde grandeur nature capable de marcher et saisir des objets ; fondation de la robotique humanoïde moderne. |
| PUMA (Unimation) | 1978 | Robot manipulateur industriel utilisé dans les secteurs automobile et électronique. |

| | | |
|---|---|---|
| Canadarm (NASA) | 1981 | Bras robotique télécommandé utilisé dans les missions spatiales de la navette spatiale américaine. |
| Sojourner (NASA) | 1996 | Robot d'exploration martienne non-humanoïde, précurseur de la robotique mobile autonome. |
| Da Vinci Surgical System (Intuitive Surgical) | 2000 | Système robotique chirurgical révolutionnant la chirurgie de précision. |
| ASIMO (Honda) | 2000 | Humanoïde bipède emblématique, capable de marcher, courir et interagir avec les humains. |
| HRP-2 (Kawada Robotics / AIST) | 2002 | Robot humanoïde grandeur nature, utilisé pour la recherche en locomotion et en interaction. |
| NAO (Aldebaran Robotics) | 2007 | Petit humanoïde programmable, utilisé dans l'éducation, la recherche et la performance artistique. |
| HRP-4C (Kawada Robotics / AIST) | 2009 | Humanoïde féminin capable de chanter et danser, utilisé dans des performances artistiques. |
| HRP-4 (Kawada Robotics / AIST) | 2010 | Humanoïde amélioré avec des mouvements plus fluides, utilisé dans la performance et la recherche. |

| | | |
|---|---|---|
| HRP-2 (Kawada Robotics / Tayeb Benamara) | 2012 | Performance hip-hop avec imitation de mouvements humains grâce à la capture de mouvement. |
| NAO (Aldebaran / Blanca Li) | 2013 | Ballet chorégraphié réunissant sept robots NAO et danseurs humains, première mondiale. |
| Atlas (Boston Dynamics) | 2013 | Humanoïde acrobatique aux capacités dynamiques avancées, capable de mouvements complexes (sauts, danses, figures au sol). |
| Pepper (SoftBank Robotics) | 2014 | Humanoïde expressif utilisé dans l'interaction sociale et spectacles chorégraphiés. |
| KUKA (KUKA Robotics / Huang Yi) | 2015 | Bras robotique intégré à une performance de danse contemporaine avec un danseur humain. |
| Kosaka (Speecys Corp.) | 2017 | Humanoïde conçu pour des performances et interactions en public. |
| Optimus-Gen (Tesla) | 2022 | Robot humanoïde orienté vers les usages généraux, exprimant une mobilité humaine simplifiée. |
| GR-1 (FOURIER Robotics) | 2022 | Robot humanoïde démontrant des capacités expressives et de marche avancée. |

| | | |
|---|---|---|
| H1 (Unitree Robotics) | 2023 | Humanoïde performant une danse folklorique chinoise en direct à la télévision nationale, grâce à l'IA. |
| RobotAct / NAO (EUR ArTeC - Scène et robotique) | 2023 | Spectacle théâtral et scientifique explorant l'interaction dramaturgique entre robots et humains. |
| Robody / HRP-4 (EUR ArTeC - CECCI−H2M) | 2021-2023 | La co-évolution comportementale et l'improvisation chorégraphique de la dépendance/co-dépendance entre des humains et des entités artificielles (robot ou système virtuel évolutif). |
| Atlas (Boston Dynamics / Monica Thomas) | 2020–2025 | Série de performances dansées, culminant avec des figures acrobatiques grâce à l'apprentissage par renforcement. |

TABLE I.2.1 – Chronologie des robots et leurs usages dans la performance ou la technologie

# Conclusion

Les robots humanoïdes de taille humaine dans les performances dansées apportent deux perspectives uniques, impossibles à explorer avec des robots non humanoïdes ou de petite taille : d'une part, leurs caractéristiques anthropomorphiques, qui soulèvent des questions sur la présence corporelle et l'empathie kinesthésique ; d'autre part, la précision de l'exécution des mouvements humains, qui introduit l'interaction nuancée entre la rigueur mécanique et la fluidité organique. Ces deux dimensions ouvrent de nouvelles voies pour la création artistique en incorporant des robots humanoïdes de taille humaine dans les performances scéniques, car l'intégration de la technologie dans la danse offre des opportunités d'élargir le vocabulaire chorégraphique et d'explorer différentes formes de mouvement qui transcendent les limitations physiques humaines. Comme l'explique le chorégraphe et chercheur Thomas DeFrantz[79] :

> L'interface technologique devient un lieu d'improvisation, où les danseurs peuvent explorer de nouveaux vocabulaires de mouvement grâce à l'augmentation technologique. [...] En intégrant les médias numériques, les chorégraphes sont capables de créer des interactions auparavant inimaginables, repoussant les limites des formes de danse traditionnelles.[80]
>
> — Thomas F. Defrantz. *Improvising the Interface, Dance Technology and the New Black Dance*

79. DeFrantz, Thomas F. *The black beat made visible : Hip hop dance and body power*. 2004.

80. « The technology interface becomes a site of improvisation, where dancers can explore new movement vocabularies through technological augmentation. [. . . ] By integrating digital media, choreographers are able to craft interactions that were previously unimaginable, pushing the boundaries of traditional dance forms »

*Studies*. (2021)[81]

Les robots de taille humaine, en particulier, avec leur capacité à exécuter des séquences de mouvements semblables à ceux des humains, fournissent aux chorégraphes un outil unique pour enrichir le vocabulaire de la chorégraphie. Lorsqu'ils sont intégrés dans les performances scéniques, cela introduit une perspective de comparaison perceptive entre les interprètes humains. Cette comparaison incite le public à reconsidérer la présence du mouvement et de l'expression humains, car elle met en lumière l'interaction nuancée entre la précision mécanique et la fluidité organique.

D'un certain point de vue, la présence de robots de taille humaine sur scène sert de miroir reflétant les complexités du mouvement humain, invitant à la fois les danseurs et les spectateurs à explorer les limites de ce qui constitue un mouvement « naturel ». La recherche dans le domaine de la danse et de la robotique, telle que celle de LaViers et al.[82], met en évidence comment les robots peuvent être programmés pour exécuter des mouvements avec un niveau de précision souvent inatteignable par les danseurs humains. Cette précision, cependant, manque des imperfections subtiles et des variations spontanées qui caractérisent la danse humaine, ce qui incite à un dialogue sur la nature des mouvements de l'expression artistique. D'autre part, en reproduisant des mouvements semblables à ceux des humains, les robots humanoïdes de taille humaine pourraient attirer l'attention sur la duplication des mouvements humains, comme marcher, tourner la tête, serrer la main, etc. Cette duplication de mouvements généralement exécutés par des êtres humains présente également une forme de danse dépourvue d'expérience vécue, mais capable d'évoquer des réponses empathiques similaires.

De plus, l'utilisation de robots de taille humaine dans les performances dansées permet d'explorer le concept de présence dans la performance artistique. Comme le

81. https://www.youtube.com/watch?v=-Mi7zL1oKo4

82. LaViers, Amy, Teague, Lori, Egerstedt, Magnus. « Style-based robotic motion in contemporary dance performance ». Dans : *Controls and Art : Inquiries at the Intersection of the Subjective and the Objective* (2014), p. 205-229.

note Dixon[83] dans son exploration de la performance numérique, la présence d'un interprète n'est pas seulement un phénomène physique mais relationnel, défini par l'interaction entre l'interprète et le public. Les robots de taille humaine, avec leurs caractéristiques anthropomorphiques, peuvent engager le public d'une manière que les petits robots ou les machines non-anthropomorphiques ne peuvent pas, créant un sentiment de présence à la fois familier et étranger. Cette dualité invite le public à remettre en question l'authenticité de la performance et le rôle de l'interprète, car les mouvements du robot sont à la fois un reflet de la chorégraphie humaine et un produit de l'intelligence artificielle. Dans le cadre de notre projet de recherche-création : CECCI-H2M, soutenu par l'EUR ArTeC et bénéficié d'une aide de l'État gérée par l'Agence Nationale de la Recherche au titre du programme d'Investissements d'avenir portant la référence ANR-17-EURE-0008[84], nous avons choisi d'explorer les possibilités d'interaction humain-robot pour la performance chorégraphique avec un robot humanoïde taille humain, plutôt qu'avec d'autres types de robot. Il s'agit d'une collaboration avec le CNRS-LIRMM (Laboratoire d'Informatique, de Robotique et de Microélectronique de Montpellier) et le concept principal du projet est d'examiner comment les nouvelles technologies peuvent non seulement être intégrées dans la performance artistique, mais également co-créer et même co-improviser avec les interprètes, en se concentrant sur la relation dynamique entre les humains et les entités artificielles autonomes, plus précisément le robot humanoïde, l'Ecosystème Virtuel Évolutif (E.V.E.) et les danseurs. Le robot avec lequel nous avons choisi de co-créer est le HRP-4, illustré dans la Fig.I.2.1, fourni généreusement par le LIRMM. Il s'agit d'un robot fabriqué en 2010 par Kawada Robotics en collaboration avec l'Institute National of Advanced Industrial Science and Technology (AIST) du Japon.

Avant d'aborder en détail la performance du danseur robot co-créé, il est crucial de discuter d'abord de la manière dont les expressions corporelles improvisées du

83. Dixon, Steve. *Digital performance : a history of new media in theater, dance, performance art, and installation*. MIT press, 2015.
84. https://eur-artec.fr/mentions-legales/

danseur ont été formées, recherchées et créées : Partie II — L'expression corporelle improvisée face aux artefacts et entités virtuelles.

# Deuxième partie

# L’expression corporelle improvisée face aux artefacts et entités virtuelles

# Chapitre II.1

# Expression corporelle improvisée au sein des objets d'art

## Introduction

L'approche d'activation interne de l'improvisation par l'hypnose et les techniques somatiques, telle que développée par Catherine Contour dans sa pratique chorégraphique Danseur Brut, trouve un écho saisissant dans le concept taoïste de *Qì*. Fondamental dans la culture chinoise, le *Qì* désigne le flux vital et animé qui imprègne tous les êtres vivants — un pont entre le corporel et le cosmique. Là où Danseur Brut canalise le mouvement de l'intérieur à travers des états hypnotiques et une sensibilité somatique, le *Qì* propose un paradigme parallèle : l'improvisation comme accord à un courant invisible qui guide l'action non par la volonté, mais par une réceptivité cultivée. Ancré dans le taoïsme, le *Qì* est comme le souffle de vie — subtil mais tangible — qui soutient le corps, informe l'émotion et oriente l'individu vers l'harmonie avec le *Tao*, principe fondamental sous-jacent à la réalité et à l'ordre spontané de l'univers. Dans des pratiques telles que le *Tai Chi*, le *Qi Gong* et la médecine traditionnelle chinoise, le corps n'est pas un simple réceptacle passif, mais un instrument sensible, entraîné à faire circuler, affiner et équilibrer ce « flux ». Cela offre un cadre complémentaire pour comprendre l'improvisation — non comme un geste aléatoire, mais comme une

pratique d'écoute ancrée dans le flux de l'activation interne. Dans ce chapitre, nous explorerons d'abord comment le *Qi* s'incarne à travers le geste dans des formes artistiques traditionnelles chinoises telles que la calligraphie et la statuaire bouddhique (Section II.1.1). Nous examinerons ensuite comment le geste corporel émerge en relation avec des objets d'art dans le contexte du projet de recherche-création « Écologies Artistiques et Numériques des Corps Vivants au Musée » (Section II.1.2), en étudiant comment le mouvement improvisé se construit et se façonne en leur présence — à travers une rencontre incarnée avec leurs dimensions spirituelles et matérielles.

## II.1.1 La calligraphie et le bouddha dans la culture chinoise

La calligraphie est l'art d'écrire les caractères chinois au pinceau et à l'encre, considérée dans la culture chinoise comme une forme artistique suprême qui synthétise les Quatre Trésors du lettré et la copie émulative des stèles et des inscriptions modèles. Elle unit le geste dynamique à la conscience esthétique[85], harmonisant expression visuelle, geste physique et réflexion philosophique. Au cœur de cette pratique réside le trait de pinceau, incarnation dynamique du *Qi* qui anime à la fois le caractère et l'esprit. La maîtrise de la calligraphie requiert l'usage coordonné du pinceau, du bâton d'encre, du papier et de la pierre à encre. Chaque outil détermine des éléments clés de l'esthétique finale — de la fluidité du trait à la profondeur des modulations tonales : le pinceau, généralement en poils de chèvre, de lapin ou de belette, offre une variation du flux d'encre et de la qualité de la ligne ; la suie et les liants du bâton d'encre, mélangeant suie de pin ou de laque avec de la colle animale et parfois des additifs aromatiques, déterminent la profondeur des tons ; l'absorption du papier Xuan, prisé pour sa résistance et son absorption uniforme, gouverne la netteté des contours ; et les pierres à encre — idéalement en pierre Duan ou She — offrent une surface lisse pour broyer l'encre, la texture de la pierre influençant également la finesse de la préparation de l'encre[86].

Les premières traces d'une écriture inspirée du pinceau sur les os oraculaires et les inscriptions sur bronze de la dynastie Shang (vers 1600–1046 av. J.-C.) témoignent de l'antique vénération pour la forme écrite[87]. Avec l'essor de la culture matérielle sous la dynastie Han orientale (206 av. J.-C.–220 apr. J.-C.), la production de matériaux calligraphiques spécialisés s'est épanouie[88], posant les bases d'une tradition artistique pleinement développée. Des cadres pédagogiques tels que les

85. https://starlingdb.org/Texts/Students/Qiu%20Xigui/Chinese%20Writing%20%282000%29.pdf
86. https://asia-archive.si.edu/learn/chinas-calligraphic-arts/four-treasures/
87. https://asia-archive.si.edu/object/F1976.32/
88. https://education.asianart.org/resources/the-four-treasures-and-other-utensils-for-a-scholars-desk/

« Huit principes de Yong »[89] ont distillé la pratique calligraphique en huit techniques essentielles du pinceau, encapsulées dans le caractère « éternité » : point, horizontal, vertical, crochet, pression, chute à gauche, chute à droite et courbe. La pratique régulière de ces principes est censée cultiver force équilibrée et souplesse dans tous les caractères en écriture régulière. Ces principes mettent en avant l'équilibre entre force, grâce et rythme — non seulement comme réalisations techniques, mais aussi comme manifestations d'une culture intérieure.

Profondément influencés par les notions taoïstes de spontanéité (*zìrán*) et de non-agir (*wúwéi*), les calligraphes cherchaient à aligner souffle personnel et mouvement, laissant le pinceau suivre le cœur dans un flux spontané mais maîtrisé. La calligraphie transcende la compétence technique pour devenir une pratique méditative : contrôle du souffle, alignement corporel et intention focalisée se synchronisent lors de l'exécution, permettant au calligraphe de canaliser le Qì à travers le pinceau et de créer un jeu dynamique entre les caractères écrits et l'espace vide qui les entoure. Ce jeu est perçu comme une métaphore de la relation entre l'humanité et le monde naturel, reflétant les concepts philosophiques du taoïsme. Ainsi, la calligraphie agit comme un pont vital entre corps, esprit et cosmos, incarnant un idéal d'harmonie esthétique et spirituelle au cœur de la pensée chinoise, et est considérée comme une forme d'auto-cultivation, exigeant discipline et concentration.

D'autre part, l'introduction du bouddhisme en Chine via la Route de la soie durant la période Han orientale a non seulement apporté des soutras sanskrits nécessitant translittération et copie, mais a aussi considérablement élevé le statut de la calligraphie à travers l'acte dévotionnel de production de manuscrits, acte largement considéré comme sanctifiant le texte et purifiant l'esprit du copiste. Les premières représentations du Bouddha mettaient l'accent sur la sérénité, l'équilibre des proportions et l'énergie rayonnante, des qualités qui ont profondément influencé les standards artistiques chinois. Par la copie des soutras et l'inscription monumentale des enseignements bouddhiques sur stèles, la figure du Bouddha

89. Chen, Xin. « "Calligraphy" and "Qi" from the Perspective of Philosophy of Information—From the Perspective of Chinese Calligraphy Theory ». Dans : *Proceedings*. T. 81. 1. MDPI. 2022, p. 142.

s'est intimement liée aux idéaux d'ordre, de clarté et de résonance spirituelle qui caractérisent la calligraphie chinoise. La nécessité de reproduire fidèlement les textes sacrés a poussé les scribes à affiner leurs techniques, intégrant une nouvelle dimension spirituelle et esthétique à la pratique de l'écriture.

Des calligraphes tels que Zhong Yao et Wang Xizhi ont jeté les bases de l'écriture régulière, atteignant un équilibre entre élégance visuelle et clarté doctrinale qui fit du Kaishu le médium standard pour les édits impériaux et les soutras bouddhiques. Mais c'est Yan Zhenqing qui a perfectionné cette tradition. Le « style Yan » a inauguré une nouvelle ère de la calligraphie, où le poids robuste et l'énergie musculaire du trait exprimaient non seulement la beauté esthétique, mais aussi la force morale de l'auteur. Chaque caractère sous la main de Yan affichait une « force de la taille », avec des piliers verticaux épais et des horizontales tendues et plus fines, créant des formes à la fois dignes et résonantes de force intérieure[90]. Plus tard, l'apogée de cette profonde confluence d'idéaux esthétiques, de dévotion spirituelle et d'autorité politique se manifeste dans la commande par l'empereur Taizong, au VIIe siècle, de la stèle du Sūtra du Cœur, exécutée en écriture semi-cursive, attribuée à Wang Xizhi et achevée sous la supervision du moine Huairen. Ce projet monumental incarne l'intégration de l'expression artistique à la propagation bouddhique, démontrant comment la calligraphie a transcendé ses origines utilitaires pour devenir un emblème spirituel et culturel.

Les idéaux esthétiques façonnés par la calligraphie bouddhique — clarté, calme intérieur, équilibre rythmique — ont commencé à résonner profondément avec la métaphysique taoïste, notamment l'idée que l'insight spirituel naît de l'harmonisation avec les forces naturelles. L'accent mis sur la cultivation intérieure et la discipline centrée sur le souffle dans la copie des soutras bouddhiques a ouvert un pont conceptuel vers les pratiques taoïstes centrées sur la cultivation du Qì. C'est dans cette confluence que le Qì émerge aussi comme un pont essentiel entre les gestes corporels et le mouvement incarné. La cultivation du Qì a évolué en

90. Li, Wenqi. « Ancient and Modern Changes in Yan Zhenqing's Calligraphy–Taking the Manuscript of Offering to a Nephew as an Example ». Dans : *2023 5th International Conference on Literature, Art and Human Development (ICLAHD 2023)*. Atlantis Press. 2023, p. 522-531.

disciplines incarnées (plutôt qu'en simples concepts métaphysiques), influençant des pratiques telles que la danse improvisée qui cherchent à aligner le flux interne du corps avec les rythmes du cosmos.

Comme mentionné précédemment, le Qì représente le pont fondamental entre les sphères matérielle et spirituelle. Les pratiques taoïstes mettent l'accent sur la cultivation, la circulation et l'harmonisation du Qì pour aligner l'individu avec le Tao — l'ordre naturel et spontané de l'univers. Dans la pratique corporelle, le *Qi* n'est pas seulement une énergie physique, mais englobe aussi des dimensions spirituelles et émotionnelles, servant de pont entre le matériel et le métaphysique. Cultiver et harmoniser le *Qi* afin de créer le dialogue et de m'aligner avec les rythmes naturels du cosmos est essentiel dans la pratique de la danse, qui trouve une expression particulière dans la danse improvisée, où mouvements et gestes deviennent les médiums d'incarnation et de canalisation du *Qi*. Cette cultivation s'exprime à travers des disciplines telles que le qìgōng et le taijiquan, qui canalisent ce flux universel, mettant l'accent sur des mouvements lents, délibérés et intentionnels synchronisés avec la respiration pour favoriser l'équilibre interne et la vitalité, facilitant la libre circulation et une profonde connexion corps-esprit. Ces principes ont profondément influencé ma manière d'exprimer la danse improvisée, où je cherche à incarner et exprimer le flux du Qì à travers la lenteur, la spontanéité, le mouvement non forcé et non prédéterminé. Dans cette approche, l'improvisation reflète l'idéal taoïste du wúwéi, l'action sans effort qui naît de l'accord avec le monde naturel. Mouvement et gestes corporels deviennent un dialogue avec les sensations internes plutôt qu'une chorégraphie extérieure, permettant une expression authentique ancrée dans la conscience du *Flow*.

Dans la danse improvisée, comme mentionné en I.1.2, la danseuse s'engage dans un mouvement spontané, guidé par les sensations internes plutôt que par une chorégraphie prédéfinie. Cette approche s'aligne également avec l'idéal taoïste du wu wei, ou action sans effort, où les mouvements surgissent naturellement et harmonieusement, sans force ni contrôle conscient. En s'accordant au Flow interne du corps et en le laissant guider le mouvement, les danseurs peuvent atteindre un

état d'unité entre corps, esprit et âme, reflétant la quête taoïste d'harmonie avec le Tao. Ces approches innovantes démontrent la pertinence durable du *Qi* comme concept fondamental dans les expressions artistiques traditionnelles et contemporaines[91].

Profondément influencée par les notions taoïstes de spontanéité (*zìrán*) et de non-agir (*wúwéi*), l'improvisation dansée transcende la compétence technique pour devenir une pratique méditative. Contrôle du souffle, alignement corporel et intention focalisée se synchronisent lors de l'exécution. Dans la section suivante, ces principes nourriront ma démarche artistique personnelle : une création de danse improvisée qui cherche à incarner l'équilibre entre spontanéité et présence, cultivé avec des objets d'art, dont la calligraphie et le Bouddha.

91. https://www.academia.edu/31070216/Intercultural_%D0%A1ommunication_Through_Dance_A_Case_Study_of_Qi_Dance_Project_English_draft_

### II.1.2 La création du geste avec les artefacts : un projet de recherche-création « Écologies Artistiques et Numériques des Corps Vivants au Musée »

Le projet UPL « Écologies artistiques et numériques des corps vivants au musée » (2020–2022), dirigé par Katia Légeret[92], est une initiative de recherche soutenue par la MSH Paris Nord dans le cadre de son appel à projets. Ce projet s'articule autour d'une démarche innovante de recherche-création qui explore les interactions sensibles entre les visiteurs, l'environnement muséal et les pratiques corporelles. Réunissant un réseau pluridisciplinaire de chercheurs et d'artistes, le projet vise à concevoir un parcours sensoriel et interdisciplinaire au sein d'un musée et de ses collections patrimoniales. Ce dispositif transforme le visiteur, passant du statut d'observateur passif à celui de co-créateur actif de l'expérience. L'objectif scientifique est de recenser et de cataloguer les gestes artistiques qui résonnent avec les différentes facettes du site—qu'elles soient urbaines ou naturelles, arborées ou construites—et avec des œuvres liées aux arts vivants, aux médias numériques et au patrimoine immatériel en lien avec les arbres.

Sur cette base, notre travail de création montre une rencontre évocatrice en face-à-face : un moment suspendu où l'œuvre devient un espace d'interaction et d'engagement. Cette idée prolonge les recherches de[93]. L'entrecroisement des disciplines crée un territoire perceptif entre-deux qui interroge la manière dont s'opèrent les interactions entre l'objet d'art et l'interprète/spectateur, entre l'ici et l'ailleurs. Cela provoque une relation évolutive et des expériences actives entre les photographies exposées, les performeurs mêlés au public, et les séquences d'images filmées provenant d'autres lieux. Nous avons choisi l'œuvre de Floris

92. https://scenes-monde.univ-paris8.fr/katia-legeret-pr
93. Helbo, André, Légeret, Katia LK. « L'expérience muséale comme traduction ». Dans : *Danser Nyota INyoka et autres médiations artistiques au musée* (2021).



FIGURE II.1.1 – Floris Neus˘ss, Nudogram Kassel, 1969, Vintage Photogram

Neusüss[94]—l'une des photographies exposées—comme source d'inspiration, présentée en Fig.II.1.1

L'exposition NOIR BLANC : UNE ESTHÉTIQUE PHOTOGRAPHIQUE – Collection de la Bibliothèque nationale de France a servi à la fois d'inspiration et de terrain d'expérimentation pour ce projet de recherche-création, qui devait être présenté au Grand Palais à Paris à l'automne 2020 (reporté en raison de la COVID-19). Nous avons choisi les « silhouettes » de Floris Neusüss comme point de départ. Réalisées dans les années 1960, les œuvres de Neusüss utilisaient les procédés sans appareil photo, comme les photogrammes, pour projeter les formes du corps humain sur du papier photosensible. Il a dit :

« ■Il est vrai que le sujet posé sur le papier photosensible présente son envers pour être enregistré, le côté dans l'ombre, l'ombre projetée par l'objet lui-même.■[95] » [87].

— Floris Neusüss. « Interview with Floris Neusüss ». The Daily Telegraph. (2010)

J'ai personnellement un véritable coup de cœur pour son travail : son empreinte corporelle évoque une danseuse évoluant dans la nature—libre, sauvage et expansif.

94. Dès les années 1960, il a développé les « Nudogramme », des photogrammes grandeur nature de corps humains nus, où la silhouette du sujet est capturée directement sur le papier photo. Ces œuvres mettent en valeur la présence et l'absence du corps de manière poétique et spectrale. Il a également expérimenté avec des interventions chimiques, mêlant photographie et peinture.

95. version originale : *It is true that the subject resting on the photo-sensitive paper presents its reverse side to be recorded, the side that is in shadow, the shadow cast by the object itself.*



(a) (b)

FIGURE II.1.2 – Maison secrète, sans nom. © https://www.youtube.com/watch?v=Q1kcDklvIUQ

Pour donner vie à nos idées, nous avons trouvé une maison secrète nichée entre montagnes et nature, dans le district de Nanzhuang à Miaoli, Taïwan.

### II.1.2.1 Un musée caché et un espace immersif

Cette maison secrète n'a pas de nom officiel; c'est un magnifique refuge appartenant au professeur Chia-Wei Li[96]. Cette résidence de trois étages abrite des centaines de milliers de reliques culturelles chinoises, dont des statues de Bouddha, des figurines en terre cuite, des vases rituels, des estampages, de la calligraphie, et bien plus encore, comme le montrent les Fig.II.1.2a, Fig.II.1.2b, Fig.II.1.3a and Fig.II.1.3b [97]. Cet espace, riche d'histoire et d'une esthétique saisissante, s'harmonise avec les montagnes et les fleurs environnantes, résonne du chant des oiseaux et ondule au gré du vent. La verdure confère aux objets culturels une présence organique et offre aux visiteurs une détente à la fois mentale et physique. Par la convergence des diverses reliques et de l'environnement naturel qui entoure la maison, le lieu devient un vecteur unique d'intention et de transmission.

La première fois que nous avons visité cette maison aux trésors, le professeur Chia-Wei Li nous a chaleureusement accueillis, racontant l'histoire de chaque objet—leur provenance, leur transport, et comment et quand il est tombé amoureux

96. https://khub.nthu.edu.tw/researcherProfile?uuid=971F10E8-E548-4801-890F-7413D04879D7
97. https://www.youtube.com/watch?v=Q1kcDklvIUQ



(a) (b)

FIGURE II.1.3 – Maison secrète, sans nom. © https://www.youtube.com/watch?v=Q1kcDklvIUQ

de ces trésors chinois. Je me souviens encore vivement du parfum mêlé de ville et de forêt à l'intérieur de la maison, de la sensation frais(même un peu froide) en touchant une statue de Bouddha, et de l'ambiance calme et paisible qui s'est imprimée dans mon esprit. Nous avons visité la maison à deux reprises : la première pour explorer, observer et comprendre—pour ressentir comment l'espace dialoguait avec mon corps en vue de la création de gestes corporels en résonance avec les arbres transformés, devenus Bouddhas dans la maison du professeur Chia-Wei Li. La seconde visite a marqué le début de notre processus créatif. Ce moment, immobile et profond, reste inoubliable pour moi. Chaque sensation et impression de la première visite s'est changé lorsque mon corps a commencé à créer avec les reliques culturelles chinoises et l'environnement naturel alentour. Cette résonance était profonde, et j'ai ressenti le besoin de tenter de la reconstruire par les mots.

Mes gestes corporels sont devenus un moyen de connexion—traversant et interagissant avec ce site—"musée sans nom" —ainsi qu'avec les œuvres patrimoniales liées aux arbres. À un moment donné de l'expérience (lorsque, penchée en avant, j'ai porté mon regard vers mes orteils ; voir Fig.II.1.4), une pensée m'est venue, les yeux fermés :

« Quelles sont ces ombres ? S'agit-il des silhouettes ? »

Il me semblait presque voir l'image créée par Floris Neusüss s'étendre d'un autre



FIGURE II.1.4 – Je penche en avant et j'ai porté mon regard vers mes orteils.

lieu jusqu'à l'endroit même où je me trouvais. Cette sensation, était si vivant, et pourtant si mystérieux.



FIGURE II.1.5 – Une inscription calligraphiée de 3,25 mètres de haut.

### II.1.2.2 Élaboration d'une grammaire pour l'improvisation corporelle

La création des gestes dansés corporels se divise en deux parties : Pierre et Bois. Elle s'appuie sur la résonance intérieure avec ce musée Sans Nom.

La pierre est associée à une précieuse inscription calligraphiée (3,25 mètres de haut ; 1,86 mètre de large). La version que nous avons vue dans le lieu de retraite du professeur Chia-Wei Li était une version en frottis, enfermée et exposée entre deux plaques de verre, comme le montre la Fig.II.1.5. Cette stèle porte le titre de « Stèle du Temple Ancestral de la Famille Yan », composée et gravée par le célèbre calligraphe de la dynastie Tang, Yan Zhenqing, la première année de l'ère Jianzhong (780 ap. J.-C.), en mémoire de son père Yan Weizhen. Le titre complet de l'inscription est : « Inscription et préface sur stèle pour le seigneur Yan — ancien grand conseiller, compagnon du prince Xue, pilier de l'État, nommé à titre posthume directeur adjoint du Secrétariat impérial, président de l'Université nationale et protecteur adjoint du prince héritier. ». Elle est actuellement conservée au Musée de la Forêt des Stèles à Xi'an. Le texte est gravé sur les quatre faces de la stèle. Les faces avant et arrière comportent chacune 24 lignes de 47 caractères, tandis que chaque côté présente 6 lignes de 52 caractères. Le contenu relate principalement l'histoire et les vertus de la famille Yan, remontant jusqu'à l'ancêtre de la cinquième génération, Yan Zhitui, en évoquant leurs carrières dans l'administration, leur culture savante et leurs contributions à la nation. Yan Zhenqing développe le caractère et les réalisations de son père Yan Weizhen, exprimant une profonde admiration et un souvenir respectueux envers ses ancêtres. L'ensemble de l'inscription transmet le respect envers les aïeux, la vénération de l'honneur familial et l'encouragement des générations futures. La stèle du Temple Ancestral de la Famille Yan représente l'apogée de la calligraphie de Yan Zhenqing, et son style régulier est désigné par la postérité comme le « style Yan ». Les caractéristiques de cette calligraphie incluent un tracé stable, une force contenue, des lignes élastiques, des formes de caractères aérées, une structure rigoureuse et des traits dignes et arrondis.[98]

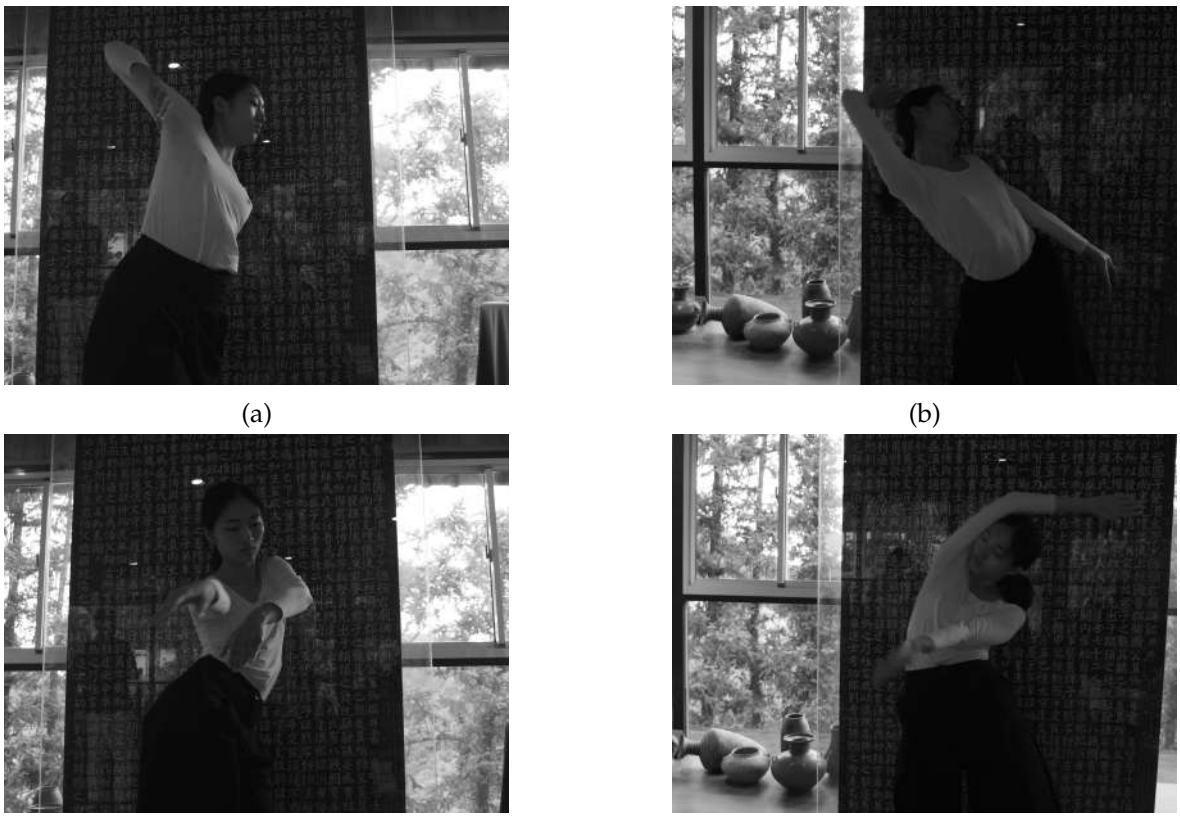
Inspiré par ses lignes élastiques et ses formes spacieuses, je me suis senti entraîné dans un dialogue intime avec la force spirituelle et esthétique inscrite dans cette calligraphie. Debout devant l'inscription, le rythme régulier du pinceau de Yan

98. https://web.arte.gov.tw/calligraphy/01wh/whwork/wh6b.htm

Zhenqing — ferme mais fluide, digne mais vivant — semblait résonner dans mon propre corps vivant. La révérence du monument pour la lignée, la gravité de son héritage moral et le poids de sa formalité ont cultivé en moi une intensité silencieuse. De cette rencontre, j'ai commencé à ré-imaginer le Qi non seulement comme un flux interne, mais comme un courant ancestral — un fil vivant traversant le temps et l'espace. Les gestes improvisés sont modelés par la respiration, la densité et la résistance spatiale. Les mouvements surgissaient tels des coups de pinceau : soudains mais contenus, circulaires mais directionnels. Par moments, je sentais ma colonne vertébrale s'étirer vers le haut, comme pour faire écho à la verticalité de la stèle, tandis que mes bras se déployaient en arcs rappelant les courbes calligraphiques. Ces postures dansées, nées d'une sensibilité écologique à l'inscription, sont devenues des actes d'incarnation de la calligraphie — non pas en imitant sa forme, mais en traduisant le ressenti qu'elle m'a transmis. Le Qi, en ce sens, est devenu le pont dynamique entre inscription et geste, pierre et souffle, mémoire et mouvement, comme illustré aux Fig.**??**.

Le bois, quant à lui, est un objet paisible lié au Bouddha et au souffle. Face aux Bouddhas assis sculptés dans le camphrier ancien et le bois de huanghuali, j'ai ressenti la douceur de leur grain sous mon regard — une invitation à entrer dans un souffle partagé. Chaque statue, polie par des siècles de mains et de temps, dégageait une chaleur sourde, comme si le bois lui-même conservait la mémoire de chaque chant et rituel ayant entouré sa forme. Inspiré par ces qualités, je me suis tourné vers mon propre corps et j'ai commencé à percevoir le Qi non seulement comme un flux interne, mais comme la résonance entre structure organique et chair vivante, une corde vibratoire unissant bois et os.

Lors de notre première visite, j'ai effleuré du bout des doigts le bras du Bouddha, percevant la souplesse des fibres vieillies sous mon toucher. Ce moment de révélation tactile a façonné ma conscience : le bois respire dans son échange lent avec l'air, absorbant l'humidité et exhalant son parfum ; mes poumons, eux aussi, se sont accordés à ce rythme, inspirant à travers des organes vivants. Lors de notre seconde visite, la relation entre le Bouddha et moi semblait transformée. Les yeux mi-clos,



(a) (b)

(c) (d)

FIGURE II.1.6 – Transformation de l'inscription calligraphique en interaction entre gestes corporels et espace, basée sur le *Qi*

j'imaginais le Qi s'élever de mon activation intérieure et rejoindre le sol de la forêt — de la graine au jeune arbre, du jeune arbre au pilier — puis circuler à travers la forme de bois de chaque Bouddha avant de passer en moi. Depuis la plante de mes pieds, ce flux montait : chevilles, genoux, hanches, poitrine, vertèbre après vertèbre. Mes bras se levaient en arcs doux, retraçant non seulement les contours des épaules des statues, mais aussi la dynamique partagée que je ressentais avec elles. La nuque se relâchait, se livrant à la courbe de cette dynamique. Dans ce lieu de retraite avec le Bouddha, les improvisations gestuelles naissaient du dialogue — ondulations de la colonne rappelant les courbes concentriques des troncs, cercles des bras évoquant le grain spiralé, et pas enracinés semblables à la sève montant de la plante des pieds jusqu'au sommet du crâne. Chaque mouvement devenait à la fois sculpture et révélation, canalisant le même flux que l'artisan avait jadis extrait de l'écorce. En ces instants, la danseuse et la statue devenaient collaborateurs : bois et corps, immobilité et mouvement, sculpteur et sculpture, unis par le Qi vivant qui soutient et transcende la forme. Dans cette présence, le corps du danseur devenait un conduit vivant, faisant circuler le Qi cultivé intérieurement vers l'espace environnant avec le Bouddha. Chaque geste corporel était une conversation avec chaque statue de Bouddha, comme le montre la Fig.II.1.7.

Après la performance, la danseuse a confié :

« Créer des gestes corporels avec le Bouddha est une expérience à la fois extrêmement exigeante et libératrice, où parfois je sens que le souffle au plus profond de mon corps se transforme en même temps que le Bouddha dans l'espace. »

Dans la phase de présentation, nous invitons le visiteur dans un univers où photographie, performance et images filmées convergent pour produire une réalité augmentée. Au cœur de cette démarche, chaque photographie est exposée selon une scénographie subtile conçue pour évoquer des instants venus d'ailleurs : vie, gestes poétiques, paysages hybrides, etc. Les visiteurs, munis d'une tablette ou de leur propre smartphone, sont invités à scanner des QR codes pour accéder à des



FIGURE II.1.7 – Conversation entre gestes corporels et Bouddha environnant, basée sur l'idée du Bois. © Daniel Chen.

séquences vidéo issues de divers contextes de création — de la statue ancienne de Bouddha et de la calligraphie à la nature de l'arbre et du paysage montagneux. Ces séquences réinvestissent le cadre de l'image fixe, prolongeant sa narration visuelle, ou cohabitent avec elle. Comme le précise le projet « Écologies Artistiques et Numériques des Corps Vivants au Musée » :

> L'objectif scientifique sera de jouer et répertorier des gestes artistiques, en résonance [... ] à des pratiques corporelles improvisées, [... ] ou à des patrimoines dits immatériels en lien avec l'arbre. Il s'agira d'arborer l'archive, de la montrer en mouvement, en réseau, et non de la reconstituer. En quoi un tel déplacement organique, par des récits mis en gestes – dans les espaces urbains, muséaux, imaginaires, virtuels, vidéo, arboretum, auditorium – la déterritorialise-t-elle ?

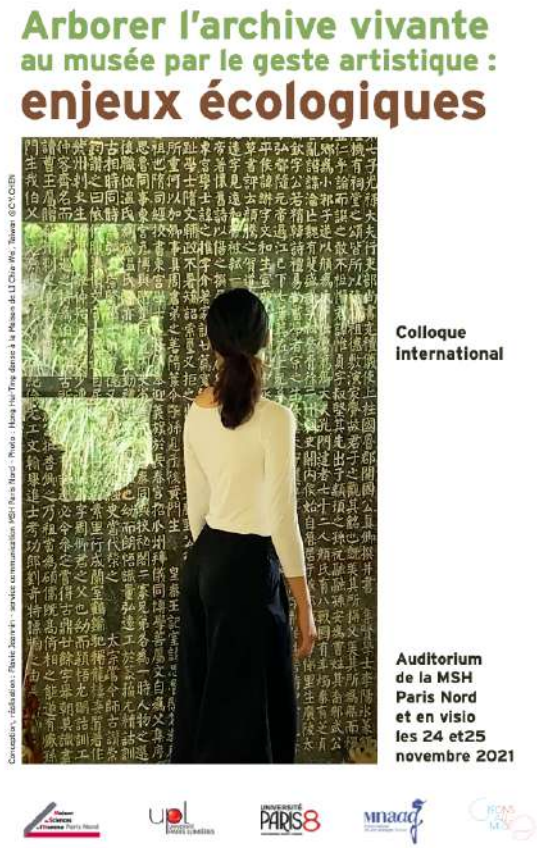
— Introduction du programme de la « Journée d'étude, Arborer l'archive vivante au musée par le geste artistique : enjeux écologiques » deux années de suite, voir Fig.II.1.8a and Fig.II.1.8b.

Plutôt que de préserver le passé par des moyens traditionnels, le projet vise à *arboréaliser* l'archive : à la faire vivre de manière dynamique et en réseau, à travers des récits incarnés par des gestes dans des espaces urbains, muséaux, imaginaires, virtuels, vidéo, arboretum et auditorium.

Au final, à travers ce projet, notre création fonctionne comme un acte de transmédialisation esthétique, où la responsabilité du chercheur-artiste en arts vivants se manifeste dans la transformation des comportements et l'engagement envers le développement durable. Cette dimension éthique et politique élève le geste créatif au rang de vecteur essentiel de la sensibilisation écologique. Et tout cela est rendu possible grâce aux gestes dansés développés dans la relation de résonance avec la calligraphie et le Bouddha dans le lieu de retraite de ce musée Sans Nom.




(a)




(b)

FIGURE II.1.8 – Couverture du programme de la « Journée d'étude, Arborer l'archive vivante au musée par le geste artistique : enjeux écologiques », 2020 et 2021

# Chapitre II.2

# Vers l'interaction d'une expression corporelle improvisée avec une machine virtuelle autonome

## Introduction

S'appuyant sur le dialogue incarné entre la danseuse et les objets d'arts exploré dans le chapitre précédent, nous passons désormais de la transcendance d'objets d'art statiques à l'exploration du virtuel, dans le cadre de la seconde interactivité. Nous avons précédemment montré comment l'activation interne, pensée à travers le concept taoïste de Qì, entre en résonance avec le geste calligraphique et la forme sculpturale, positionnant le corps non pas comme simple vecteur expressif, mais comme un agent sensible et co-créateur. Si ces rencontres révélaient déjà comment des artefacts esthétiques et spirituels peuvent susciter un mouvement improvisé, elles restaient toutefois ancrées dans une matérialité fixe. Le passage ici à une interaction dynamique avec des entités numériques autonomes ne marque pas une rupture avec ces principes, mais plutôt une continuité : il s'agit d'interroger la manière dont l'activation interne se déploie dans des environnements qui ne sont plus seulement réactifs, mais également génératifs. Au cœur de cette exploration se trouve l'Écosystème Virtuel Évolutif (E.V.E.), une scénographie numérique

symbiotique jouant à la fois le rôle de partenaire d'improvisation réactif et celui de performeur artificiel. Dans cet espace, les gestes de la danseuse – façonnés par son Qì cultivé – ne sont pas simplement projetés vers l'extérieur, mais s'engagent dans un processus de transformation réciproque, co-construit en temps réel selon la logique propre d'E.V.E. En étendant la notion de flux intérieur à un environnement computationnel, ce chapitre examine comment la création du geste corporel se déploie à travers la collaboration humain–machine, révélant les modalités de co-agencéité et de réactivité de l'improvisation dans des environnements médiatisés par la technologie.

## II.2.1 L'écosystème virtuel évolutif (E.V.E.) du point de vue de la danseuse

L'Écosystème Virtuel Évolutif (E.V.E.) représente un système numérique autonome, permettant une co-création symbiotique entre les danseurs et un système d'images de synthèse. Développé par la Dr. Isadora TELES de CASTRO[99], E.V.E. a été conçu à la fois comme un agent scénographique et un partenaire d'improvisation lors de performances en temps réel, en particulier pour la danse. De manière générale, E.V.E. intègre des principes de la vie artificielle, de modélisation multi-agents et d'interaction cybernétique de second ordre, et transcende le rôle conventionnel de la scénographie numérique pour devenir un co-acteur dynamique qui stimule l'émergence esthétique par des comportements adaptatifs.

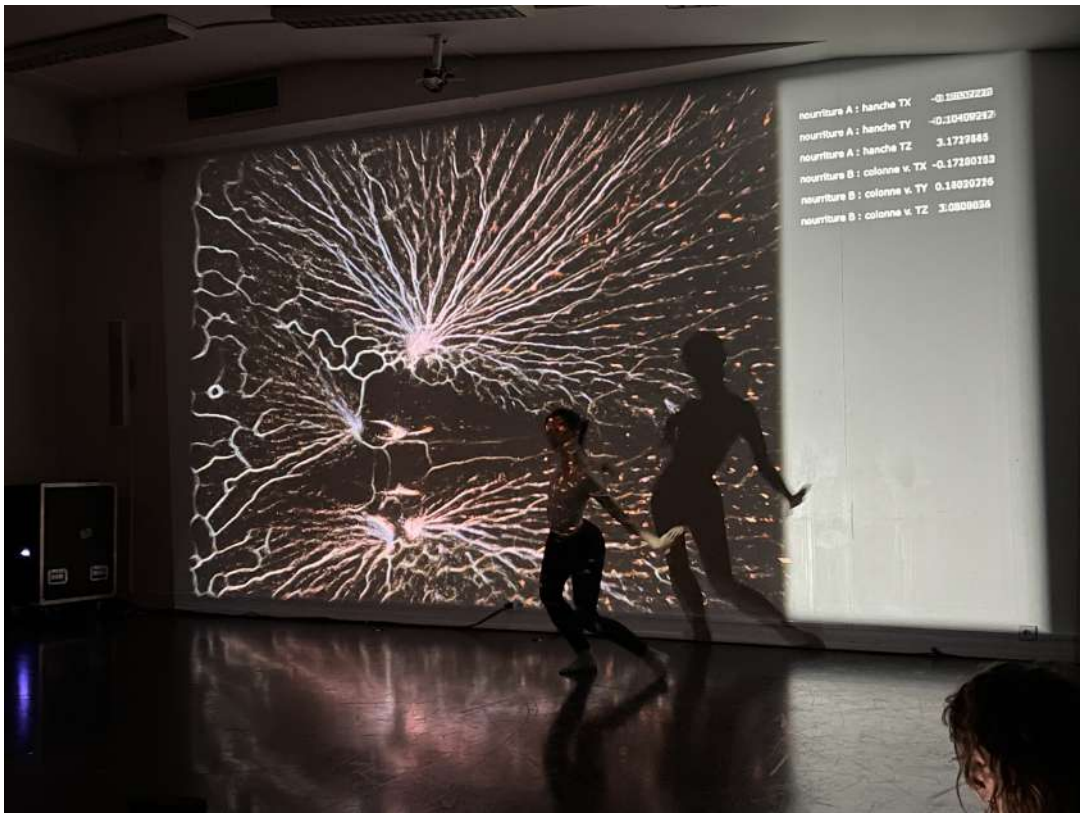



FIGURE II.2.1 – E.V.E. est projeté sur le grand mur.

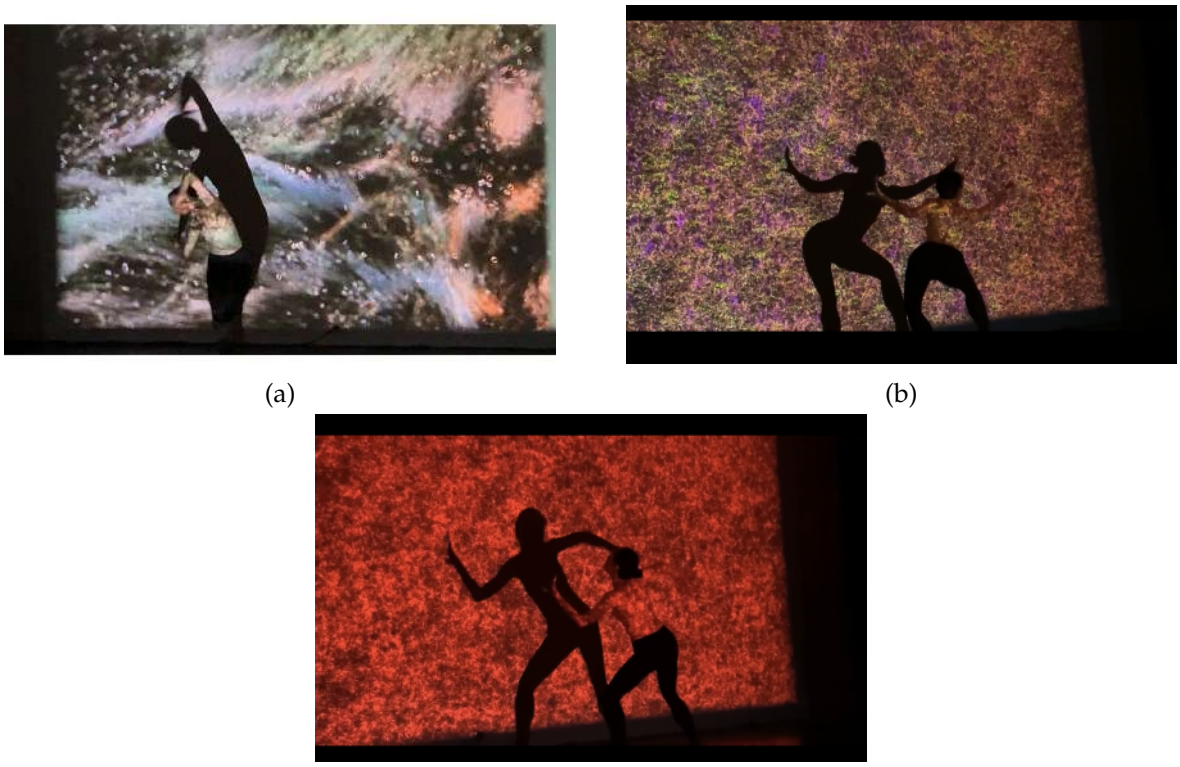
Au cœur du système E.V.E. se trouve sa conception en tant qu'environnement

99. Dr. Isadora TELES de CASTRO, thèse de doctorat : « *Scénographie-personnage : Création d'artefacts virtuels autonomes pour les arts de la scène* »

multi-espèces basé sur des agents, dans lequel chaque agent adopte des comportements inspirés du vivant, codés à l'aide d'un algorithme génétique (GA). Le système comprend trois espèces principales : la première imite un hybride entre le comportement de recherche de nourriture des fourmis et celui du Physarum, détectant des traces de phéromones virtuelles à travers l'intensité des pixels pour déterminer la direction ; la deuxième implémente le modèle de « boids », s'alignant, se séparant et se regroupant en fonction de la position et de la vitesse des voisins ; la troisième suit une marche aléatoire biaisée, influencée par la localisation d'attracteurs ou de points de *nourriture* désignés. Ces sources de nourriture sont dynamiquement reliées aux données de mouvement du danseur, captées par un capteur Kinect[100] et intégrées à l'écosystème comme stimuli influençant le comportement des agents. Les comportements des agents sont régis par une forme d'ADN artificiel, et E.V.E. utilise un GA dans lequel les agents consomment de l'énergie virtuelle, se reproduisent par croisement et mutation lorsqu'ils sont suffisamment nourris, et meurent lorsqu'ils sont épuisés, mettant ainsi en œuvre un système évolutive de comportements. Ce mécanisme garantit que l'écosystème virtuel n'est pas programmé de manière statique, mais se façonne dynamiquement à travers des transformations continues et imprévisibles. Pour plus de détails, veuillez consulter la thèse de doctorat de la Dr. Isadora TELES de CASTRO. Plusieurs images du système E.V.E. sont présentées dans la Fig.II.2.2

Au début, je regarde E.V.E. comme un système extérieur à moi, comme un environnement vivant mais séparé de mon corps. Mon regard se fixe d'abord sur ses couleurs — vives, parfois presque trop intenses — et sur la manière dont les particules s'organisent, se déplacent, apparaissent et disparaissent. Certaines attirent mon attention par leur couleur singulière ou par leur manière instable, presque nerveuse, de bouger. Mais ce n'est pas seulement une question d'individus : ce que je perçois surtout, c'est une impression d'ensemble, comme si je regardais un groupe, un collectif en mouvement. Cela me donne une image, presque instinctive — celle d'une sorte de tribu animée, colorée, mouvante. Cette

100. Zhang, Zhengyou. « Microsoft kinect sensor and its effect ». Dans : *IEEE multimedia* 19.2 (2012), p. 4-10.



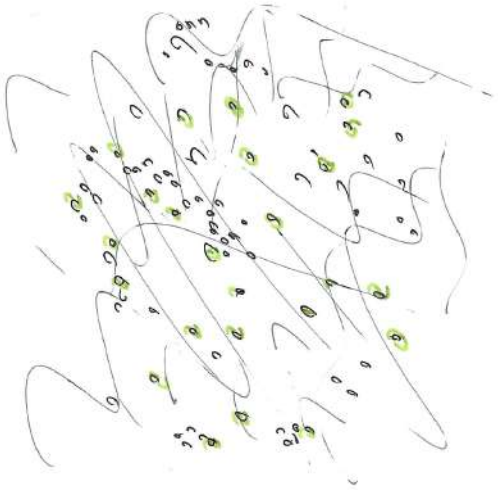
(a) (b)

(c)

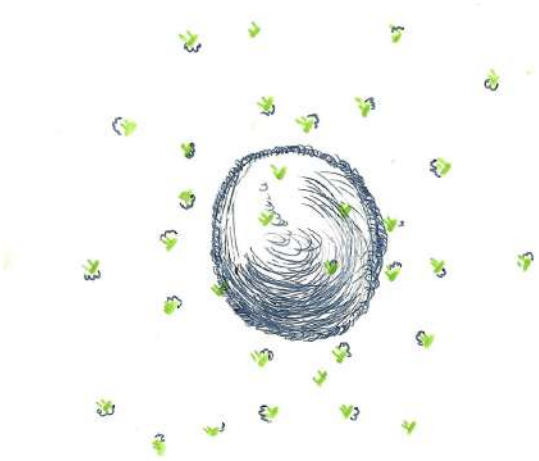
FIGURE II.2.2 – Images du système E.V.E.

perception globale déclenche en moi une sensation étrange : celle d'un espace sans bord, d'un univers visuel flottant. Et quand le E.V.E. est projeté sur le grand mur, illustrée dans le Fig.II.2.1, je ressens presque physiquement cette sensation d'être suspendue au-dessus d'un monde autre, comme si je nageais au-dessus de quelque chose que je ne peux pas vraiment toucher.

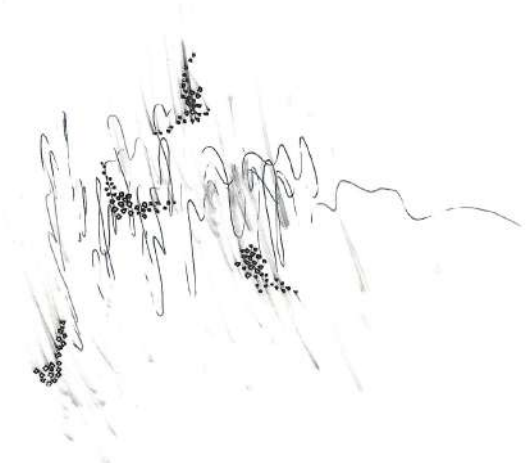
Ce sentiment de « flottement » devient le point de départ de mon engagement corporel. Je sens qu'il y a une source, un centre de gravité dans ce système — ce que le système appelle les « sources de nourriture », je le ressens autrement, plus intuitivement. Ce n'est pas issu de ma compréhension technique d'E.V.E., mais plutôt de mon image intérieure de ce que j'en vois. À partir de là, je commence à formuler des notes, des croquis, à tracer ce que cette image me fait ressentir (voir Fig.II.2.3a, Fig.II.2.3b et Fig.II.2.3c). Mon processus de création se développe à partir de cette image et perception — je commence par une écoute de mon propre Qi, un flow interne, et c'est depuis cet endroit que je crée une improvisation, un processus



(a)



(b)



(c)

FIGURE II.2.3 – Le danseur concrétise son imagination d'E.V.E. en la représentant graphiquement.

partagé avec l'écosystème E.V.E. (au lieu d'essayer de chercher un lien avec le système E.V.E.). C'est cette relation que nous approfondirons dans la section suivante, **??**.

## II.2.2 La co-création avec E.V.E.

Il y a un sentiment très particulier qui revient toujours : celui de ne plus être seul dans l'espace. Je ne fais pas que danser — je coexiste. Avec quelque chose qui bouge aussi, quelque chose qui répond — pas toujours, pas de façon prévisible — mais quelque chose de vivant et d'autonome. E.V.E. ne me suit pas. Elle n'imite pas. Elle perçoit. Elle s'ajuste selon sa propre logique, ses propres priorités. Et je développe mes gestes au sein de cet écosystème partagé.

Ce processus de création corporelle se divise en deux parties : i) Le mécanisme clé qui inspire la co-création des gestes corporels avec E.V.E., ii) Trois principes pour la création de gestes corporels en collaboration avec E.V.E., qui contribuent à remodeler et à faire évoluer les gestes corporels. Plus de détails seront également abordés dans la section I.3.3.2.

### II.2.2.1 Le mécanisme clé qui inspire la co-création de gestes corporels avec E.V.E.

Il est important de préciser que la capacité interactive autonome d'E.V.E. opère à deux niveaux interdépendants : endogène et exogène. L'interaction endogène décrit les dynamiques internes d'auto-organisation entre les agents au sein du système virtuel. Les agents perçoivent et réagissent aux comportements des uns et des autres, générant ainsi des motifs émergents qui ne peuvent être prédits uniquement par leur programmation individuelle. Ces dialogues internes — tels que l'alignement, l'évitement des collisions ou le suivi de gradients de phéromones — donnent naissance à des formations collectives complexes qui reflètent des phénomènes biologiques et constituent la substance visuelle et cinétique de la scénographie virtuelle. L'interaction exogène, en revanche, désigne l'engagement du système avec l'environnement extérieur, en particulier avec la danseuse. Nous avons adopté un modèle interactif de second ordre, dans lequel le système ne se contente pas de réagir à une entrée, mais s'adapte en fonction d'un engagement soutenu avec l'environnement. Plutôt que d'utiliser des mécanismes de contrôle

direct, la conception du système privilégie des interactions indirectes[101] qui préservent l'autonomie des actions humains ainsi que celles des machines virtuelles.

La danseuse (moi), grâce au mécanisme indirect du système, ne contrôle pas le système mais l'explore par l'expérimentation corporelle. Les mouvements et gestes corporels ne sont pas chorégraphiés à l'avance ; ils émergent en réponse au retour visuel de l'écosystème en évolution. Je pourrais ajuster mon rythme, mon intensité et mon orientation spatiale pour m'harmoniser avec la dynamique du système. Par exemple, des mouvements plus lents laissent plus de temps aux agents pour réagir et atteindre les points d'attraction, ce qui renforce la visibilité des réactions des agents et influence les comportements sélectionnés et renforcés par l'algorithme génétique.

#### II.2.2.2 Trois principes pour étendre les gestes corporels et la création de gestes corporels en collaboration avec E.V.E.

Ce sentiment de cohabiter un écosystème partagé, plutôt que de contrôler un système réactif, a déplacé mon attention de la sensation corporelle interne vers l'exploration spatiale. Ce mode d'engagement collaboratif émerge à travers trois orientations interdépendantes, qui accordent le corps aux rythmes environnementaux et aux qualités affectives du comportement projeté d'E.V.E. En pratiquant ces trois principes, moi, en tant que danseuse, je cultive une présence résonante dans laquelle les gestes corporels émergent de manière organique, ni entièrement prescrits, ni totalement spontanés.

Dans la première direction : l'alignement vertical, la position debout devient un pont actif entre le ciel et la terre, cultivant un flux continu de *Qi* qui relie les champs invisibles et tangibles, comme illustré à la Fig.II.2.4a. Plutôt qu'une posture figée, l'alignement vertical fonctionne comme un conduit ouvert : j'essaie d'observer l'agitation d'E.V.E. dans le champ projeté, puis j'affine mon centre de gravité et

101. Par exemple, les données squelettiques de la danseuse ne sont pas traduites en commandes directes pour les agents, mais servent plutôt à repositionner les attracteurs de nourriture dans le système, influençant ainsi le comportement des agents sans supprimer leur autonomie. Cette indirectivité préserve le potentiel émergent du système tout en permettant à la danseuse de moduler de manière interactive l'atmosphère esthétique.

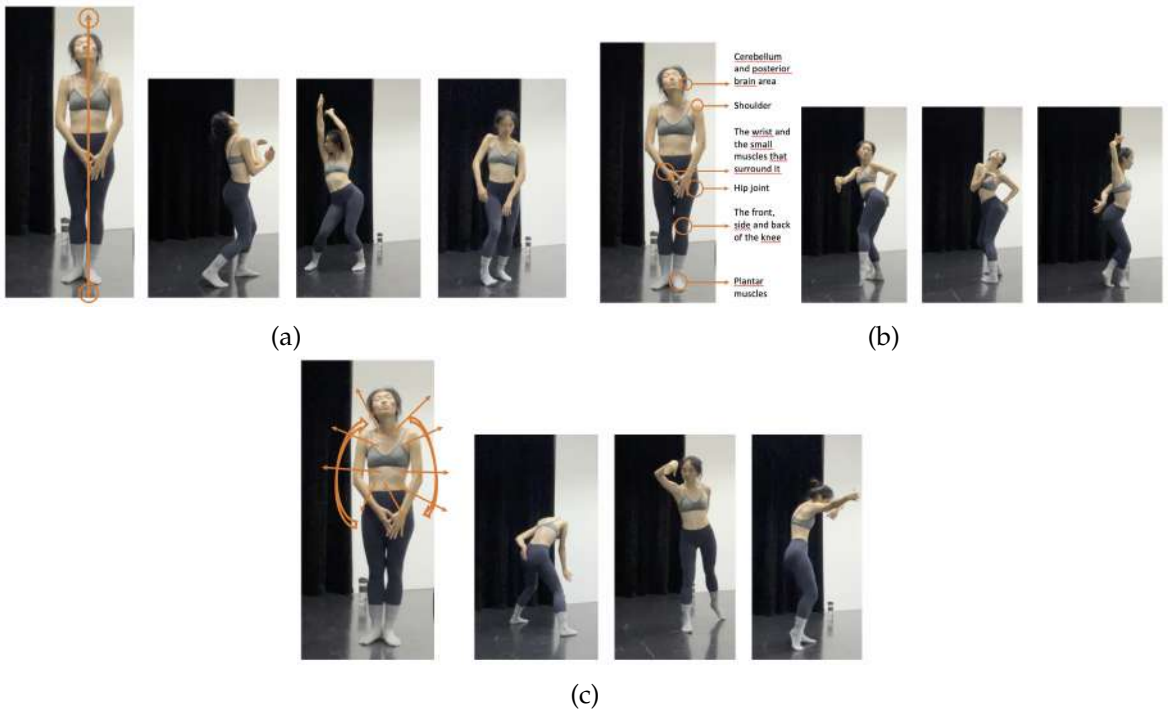



FIGURE II.2.4 – Trois principes pour étendre les gestes corporels.

mon ancrage en réponse. Ici, mon corps écoute avant de bouger, laissant les indices visuels informer mon point d'ancrage, l'équilibre et les petits déplacements de poids. La deuxième direction : l'expansion centrée sur les articulations, naît d'une extension de l'attention à travers les articulations et les muscles. Au lieu d'imposer des formes prédéterminées, chaque articulation—coude, épaule, genou, hanche—devient un nœud focal d'un *Qi* qui rayonne vers l'extérieur, comme illustré à la Fig.II.2.4b. Je cultive un dialogue plus lent, plus dense : lorsque j'allonge un membre, les agents virtuels hésitent au seuil de ma portée. Si je bouge trop vite, ils ne suivent pas. Si je reste trop immobile, ils s'éloignent. Cette hésitation offre une marge temporelle et spatiale au sein de laquelle découvrir de nouveaux vocabulaires gestuels. Ainsi, cette direction génère des formes instables et poreuses qui oscillent entre extension et contraction, ouvrant des espaces pour que le E.V.E. interagisse avec la présence de la danseuse (moi). La dernière direction, la plus interne, se centre sur la colonne vertébrale et le dos : le flux central issu de l'impulsion vertébrale et de la mémoire cinétique—activant le *Qi* à sa source, comme illustré à la Fig.II.2.4c.

La colonne vertébrale est le point de départ de l'impulsion. Je roule, j'étends, je comprime, je relâche. Le *Qi* prend ici sa force. En engageant ce noyau cinétique, je

sens l'écosystème se réorganiser lentement et les agents ne réagissent pas instantanément. Je ne provoque donc pas un simple effet — je laisse une empreinte. Et cette empreinte façonne les comportements à venir. Mes gestes spinaux participent à l'évolution de l'environnement virtuel. Ici, l'interaction devient organique, elle dépasse la logique immédiate de cause à effet : chaque articulation vertébrale trace des sillons dynamiques dans la mémoire de l'écosystème, nourrissant une co-agencéité organique et évolutive entre la danseuse et la machine

Ces trois orientations me permettent de danser non pas contre un système, ni en accord avec une scénographie, mais au sein d'un organisme vivant et autonome. E.V.E. n'est pas réactive au sens traditionnel—elle est adaptative. Comme l'a mentionné Isadora dans son article :

> Alors qu'au départ, nous n'avions ni script ni description pour la performance, la structure narrative a commencé avec le développement du système virtuel. Nous avons manifesté notre imagination d'une performance virtuelle de l'autonomie tout en construisant le comportement et les interactions entre les agents. Cette autonomie, dans notre cas, ne s'exprime pas seulement au niveau individuel virtuel, mais aussi dans les apparitions collectives émergentes. Il s'agit de multiples interactions endogènes et d'interactions exogènes indirectes, induisant imprévisibilité et un sentiment de désobéissance, de résistance, voire de conflit. De plus, le choix de perdre le contrôle sur la transformation du système abstrait aussi notre intentionnalité. Le système met en acte nos intentions et idées initiales, puis il est laissé à se développer de manière indépendante.

— Isadora Teles de Castro e Costa, et al. « A Performance Co-Created with an Autonomous Virtual System : A Symbiotic Approach », p.7. [102] [103]

102. Costa, Isadora Teles de Castro E, Hong, Hui-Ting, Chen, Chu-Yin. « A performance co-created with an autonomous virtual system : A symbiotic approach ». Dans : *International Symposium on Electronic Arts [ISEA2023]*. 2023.

103. version originale : *While, initially, we did not have a script or description for the performance, the narrative's structure began with the virtual system's development. We manifested our imagination about a virtual performance of autonomy while constructing behavior and interactions between agents. That autonomy,*

Ce modèle interactif de second ordre ouvre la voie à une présence élargie. J'improvise au sein d'une relation en perpétuel changement, et chaque geste corporel est une proposition. Le sentiment d'imprévisibilité, induit par la logique autonome des agents, exige une ouverture performative qui examine à la fois l'improvisation cultivée par le Qi et les inter-actions entre la danseuse et les entités virtuelles.

*in our case, is not only expressed at the virtual individual level but on the emergent collective appearances as well. It is about multiple endogenous and indirect exogenous interactions, inducing unpredictability and a sense of disobedience, resistance, or even conflict. Furthermore, the choice of losing control over the system's transformation also abstracts our intentionality. The system enacts our initial intentions and ideas, and then it is left to develop independently.*

## II.2.3 La performance « Le Mythe d'immorta »

« Le Mythe d'Immorta », une performance dansée, a été créée à partir de gestes corporels élaborés et co-construite avec l'écosystème virtuel évolutif (E.V.E.) — une scénographie numérique autonome et interactive — en tant qu'exploration de la co-évolution entre corps vivants et entités artificielles. Conçue et réalisée lors d'une résidence au Centre des Arts d'Enghien-les-Bains avec le soutien de l'EUR ArTeC, cette performance constitue une étude de cas visant à explorer comment, dans le cadre du spectacle vivant, des gestes corporels nourris par un Qì cultivé peuvent interagir en temps réel avec un système computationnel virtuel régi par sa propre logique générative. Un enregistrement de la performance est disponible à : https://vimeo.com/768581091

LE MYTHE D'IMMORTA : (citation de la direction artistique)
« Une plongée entre deux mondes, l'un robotique, l'autre organique. Dans un monde hybride, les mutations qui s'opèrent créent deux voies, celle du chaos et celle du Tao. »

La performance s'inscrit dans un espace scénique où la frontière entre la danseuse et la scénographie virtuelle autonome s'estompe. Cette dualité ne se limite pas à un simple thème, elle se manifeste concrètement dans la dramaturgie en constante évolution qui se tisse entre la danseuse et E.V.E. — un système qui ne fonctionne pas d'opérer en arrière-plan, mais qui agit comme un véritable interprète, animé par ses propres rythmes temporels et réponses expressives. Le vocabulaire des mouvements et gestes corporels de la danseuse — développé sous la guidance du Qi et façonné avec E.V.E. — sert à la fois d'entrée et de réponse au sein de ce système d'accordage mutuel. Plutôt que de suivre une structure chorégraphique prédéterminée, la performance se construit à travers une dynamique relationnelle émergente, où les gestes sont continuellement modulés par l'environnement virtuel, et vice versa. Cette boucle de rétroaction dynamique

illustre un processus d'improvisation symbiotique, où l'humain et la machine co-composent en temps réel la texture affective et spatiale de la performance. En mettant l'accent sur l'interaction entre la danseuse, E.V.E. et l'environnement scénographique, « Le Mythe d'Immorta » illustre comment une approche incarnée et les systèmes technologiques peuvent co-créer une forme de dramaturgie— ni entièrement écrite à l'avance, ni totalement improvisée, mais façonnée instant après instant par la perception relationnelle, la réactivité et une transformation mutuelle.

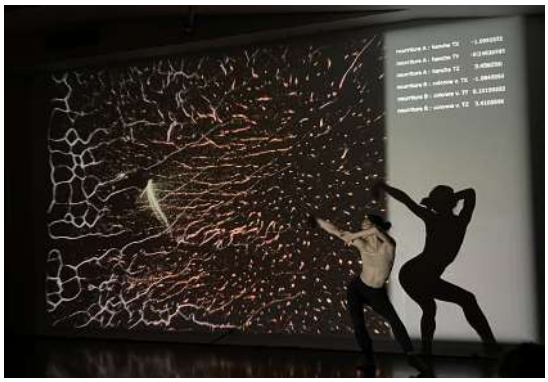
### II.2.3.1 Indices des trois saisons

La structure de cette performance se compose de trois environnements scénographiques — identifiés métaphoriquement comme l'Hiver, le Printemps et l'Automne — chacun représentant des états de *Qi* et des chorégraphies visuelles distincts.

Ces phases saisonnières ont émergé lors des sessions exploratoires de la directrice artistique avec E.V.E., où elle a identifié des marqueurs affectifs et esthétiques dans le comportement du système. Elle a traduit ces découvertes en cadres conceptuels guidant le rythme, la tonalité visuelle et l'atmosphère chorégraphique de la danseuse :

— L'hiver se manifeste par des états d'inertie et de latence : « graines endormies, repos, réagencement. » Les agents virtuels se déplacent lentement et rarement, dessinant des motifs peu denses dans une palette chromatique froide. La danseuse répond par des gestes intériorisés et lents, évoquant un paysage en dormance, comme on le voit dans la Fig.II.2.5a.

— Le Printemps marque une phase de croissance et d'expansion : « gouttes qui s'évaporent, ruisseaux qui coulent, rivières qui errent. » Les agents évoluent avec dynamisme et densité, générant des formations agitées, organiques et instables. Les gestes de la danseuse deviennent plus animés et ouverts, favorisant un enchevêtrement visuel avec les agents, comme illustré dans la Fig.II.2.5b.



(a) Hiver



(b) Printemps



(c) Automne

FIGURE II.2.5 – Trois environnements scénographiques de MYTHE D'IMMORTA.

— L'Automne évoque des thèmes de convergence et de transformation : « feuilles mortes, cueillette, rencontre. » L'interaction devient très lente, presque statique, et plus chargée émotionnellement. Visuellement, E.V.E. produit des textures et mouvements superposés, tandis que la danseuse adopte des gestes de récolte, de retrait et d'absorption, menant la narration hybride vers sa conclusion, comme le montre la Fig.II.2.5c.

Ces métaphores saisonnières, bien qu'abstraites, servent de vocabulaire commun entre disciplines — des mots clés permettant la collaboration entre direction artistique, conception du système et interprétation corporelle. Les saisons ne sont pas des structures imposées, mais des espaces dramaturgiques émergents, construits à partir d'ajustements en temps réel et de réponses interprétatives entre la directrice artistique, le développeur et la danseuse.

### II.2.3.2 Je ne danse pas seul

Le processus de création de « Le Myth d'Immorta » a été profondément nourri par des sessions d'expérimentation importante qui ont permis à chaque participant

de rencontrer et de s'adapter aux comportements du système virtuel autonome. Lors des répétitions, la danseuse était invitée à explorer comment ses gestes corporels, détectés via Kinect et traduits en points-nourriture dans E.V.E., influençaient les trajectoires et les formations des agents virtuels. Cette forme d'interaction indirecte exigeait d'elle qu'elle abandonne les notions traditionnelles de contrôle pour adopter une improvisation réactive et située. Au départ, la danseuse a décrit son expérience comme une immersion dans un espace dépourvu de gravité — semblable à une suspension dans l'espace intersidéral. Son langage corporel n'était pas prédéterminé, mais émergeait de manière organique à partir de sa perception de l'environnement. Au fil des sessions, la danseuse a commencé à affiner son intention dans l'action. Son improvisation a évolué d'une exploration purement introspective de l'énergie corporelle vers une sensibilité perceptive accrue à la densité, au rythme et à la réactivité des agents.

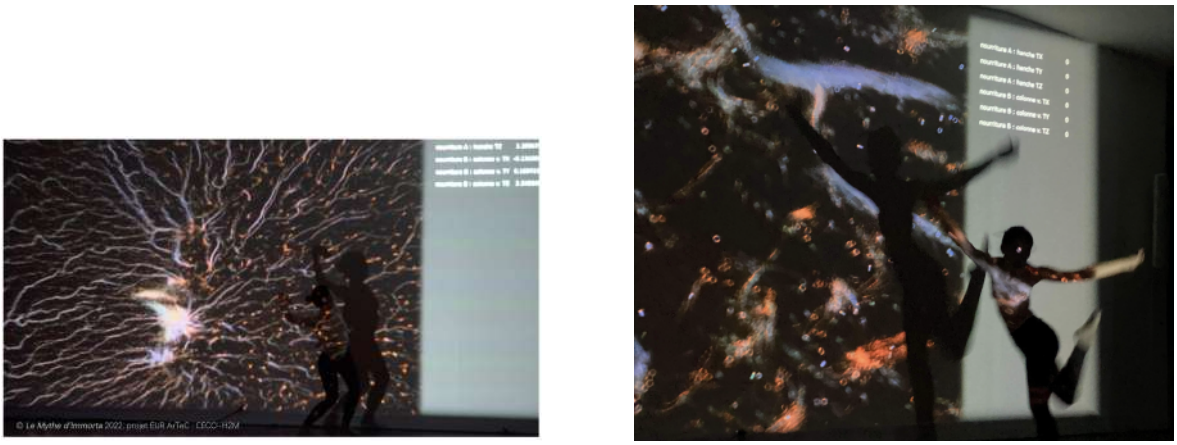
Entrer dans l'espace de répétition revenait à franchir un seuil vers l'apesanteur. La danseuse se souvient :

« Je me souviens avoir levé le bras, m'attendant presque à flotter au-delà de mon propre corps. Il n'y avait pas de sol sous mon imagination. »

Les capteurs Kinect transformaient chaque arc, extension et spirale en nœuds — des points-nourriture — qui alimentaient les agents virtuels d'E.V.E. Lors de ces premières expérimentations, elle a découvert que le mouvement pouvait être une proposition plutôt qu'une directive :

« Mes gestes sont devenus des invitations. Le système n'obéissait pas ; il dialoguait. »

À chaque session, elle s'accordait davantage aux rythmes et aux densités des agents, percevant leur dynamique virtuelle comme un partenaire vivant dans l'espace. Avec le temps, des saisons thématiques — le calme de l'hiver, l'éclosion du



(a) (b)

FIGURE II.2.6 – Contraste entre les phases hivernale et printanière : la lenteur des réactions des agents en hiver incite la danseuse à ralentir (à gauche, (a)), tandis qu'au printemps, une réactivité accrue favorise des échanges plus rapides et une dynamique de co-construction plus riche (à droite, (b)).

printemps — sont devenues des textures essentielles qu'elle incarnait. Il est important de noter que ses mouvements étaient calibrés lors des répétitions pour s'aligner sur les comportements des agents. Par exemple, lors de la phase hivernale, la lenteur des réactions des agents obligeait la danseuse à ralentir ses propres gestes, laissant au système le temps de suivre et de répondre, illustré dans la Fig.II.2.6a. À l'inverse, au printemps, l'augmentation de la réactivité des agents permettait des échanges plus rapides et des dynamiques co-construites plus riches, illustré dans la Fig.II.2.6b. Cet ajustement réciproque est devenu le cœur du processus de co-création. Les gestes de la danseuse ne fonctionnaient pas comme des commandes, mais comme des propositions ou des négociations, façonnant la scénographie évolutive de manière contingente et émotionnellement résonante. Ce processus a brouillé les frontières, mettant l'accent sur l'interaction symbiotique plutôt que sur la domination ou le contrôle.

« En hiver, je bougeais plus lentement et je murmurais plus doucement, comme une rivière sous la glace — toujours en mouvement, mais avec une retenue silencieuse. »

réfléchit-elle.

« Puis le printemps est arrivé, et c'était comme découvrir un nouveau battement

de cœur dans mes veines. Même le plus petit mouvement de mon poignet faisait onduler E.V.E. »

Ses improvisations sont passées d'explorations introspectives du *Qi* à un dialogue riche : elle a commencé à anticiper les moments de stase et d'éruption, tissant ses gestes corporels à travers l'évolution de la vie artificielle numérique d'E.V.E. Les notes de la danseuse révèlent comment ce processus a transformé sa pensée :

« Je pensais que la chorégraphie consistait à façonner le mouvement ; maintenant, je la conçois comme une façon de façonner l'attention. E.V.E. m'a montré que ma conscience pouvait danser autant que mes membres. »

À travers des entretiens d'élicitation et l'analyse vidéo, nous avons révélé que le vocabulaire expressif de la danseuse s'était transformé au fil de son dialogue avec E.V.E. Les comportements émergents du système nourrissaient des projections imaginaires, incitant la danseuse à improviser selon des rythmes, des densités et des tonalités émotionnelles qui n'auraient pas surgi dans un cadre chorégraphique traditionnel. Cette performance dansée devenait un laboratoire vivant. Au fur et à mesure de ses mouvements, le développeur du système ajustait en temps réel des variables — vitesse, forces d'alignement, seuils de réponse — tandis que la direction artistique proposait des indications pour collaborer avec la danseuse. Ces performances n'étaient jamais reproductibles ; chacune marquait un événement co-créatif unique, une chorégraphie éphémère née de l'adaptation mutuelle.

Dans la note de la danseuse :

> *E.V.E. ne se contentait pas de me répondre — il me guidait, ou plutôt m'inspirait à aller vers l'inattendu. La danse n'est pas seulement un déplacement dans l'espace — c'est un (é)change d'attention et d'intention. Avec E.V.E., j'ai accédé à un universe de possibles que la danse, à elle seule, ne m'aurait jamais révélé.*

En plaçant l'expérience de la danseuse au centre, « Le Myth d'Immorta » s'affirme comme un témoignage de la co-création incarnée — là où la danseuse et la

machine virtual algorithmique convergent, et où le geste corporel devient une passerelle pour communiquer avec des entités artificielles. Parallèlement au parcours de la danseuse, le développeur du système et la direction artistique exploraient leur propre terrain de co-création. Le directeur introduisait des métaphores saisonnières codées comme principes directeurs, et le développeur ajustait les paramètres d'E.V.E. en conséquence. Pourtant, ces apports ne dictaient pas les résultats ; le système conservait un degré d'imprévisibilité qui résistait à tout contrôle déterministe. En performance, le développeur assumait un rôle performatif, ajustant les variables du système en temps réel pour découvrir des points d'équilibre esthétique où pouvait émerger une harmonie entre la danseuse et l'écosystème virtuel évolutif.

> *Mes recherches sont centrées sur l'interprétation des mécanismes qui se produisent à l'intérieur de mon corps lorsque je danse, comme Qi présentielle qui passe à travers mes mouvements et le son qu'ils produisent. Je considère que Qi flotte de l'intérieur vers l'extérieur, de nos organes vers notre peau, et d'un media vers un autre média. Ainsi, je ne danse pas seule ; je ne danse pas non plus avec mon corps : le danse avec chaque média, avec l'énergie transmise des organes au squelette, et à l'espace qui nous entoure. Chaque media est un organisme, qui évolue, se diversifie, et co-créé dès qu'il existe.* (Citation de la danseuse)

La citation ci-dessus résume et incarne la philosophie qui sous-tend la relation de la danseuse avec le système autonome dans « Le Myth d'Immorta ». Contrairement aux scénographies interactives conventionnelles, E.V.E. n'était pas traité comme un simple arrière-plan visuel réactif, mais comme une entité cohabitante — une présence évolutive avec laquelle la danseuse négociait l'espace, le rythme et l'intention. L'autonomie du système garantissait que ses réponses n'étaient pas toujours prévisibles ou symétriques. Les gestes de la danseuse étaient transformés par la logique interne d'E.V.E. et le comportement collectif de ses

agents. Plutôt que de diminuer l'expérience, cette imprévisibilité amplifiait le sentiment de présence de la performance.

L'interaction évolutive conduisait également à des transformations mutuelles. La danseuse influençait quels agents survivaient et se reproduisaient (par la proximité et les points-nourriture), tandis qu'E.V.E. conditionnait la proprioception et la prise de décision de la danseuse. Cette boucle de rétroaction était particulièrement visible lorsque la vitesse et la dynamique de regroupement des agents modifiaient la densité temporelle de l'espace scénique, obligeant la danseuse à ajuster sa respiration et sa direction en temps réel selon sa perception du flux de changements d'E.V.E.

Lors de la présentation de la performance, le développeur du système jouait un rôle de médiateur entre le système en évolution et les besoins de la performance, ajustant les paramètres en temps réel en réponse aux improvisations de la danseuse et aux orientations de la direction artistique. Toutefois, en raison de la nature émergente du système, il était impossible d'en reproduire fidèlement le comportement — chaque performance devenait ainsi une manifestation unique de la relation symbiotique. Finalement, c'est le refus de la danseuse de dominer ou d'instrumentaliser le système qui permet à cette performance de se présenter comme une chorégraphie symbiotique. Il s'agit d'une improvisation partagée entre êtres organiques et synthétiques, invitant le public dans un écosystème poétique où la création est collective, autonome et ouverte à la transformation.

#### II.2.3.3 De l'interaction homme-machine virtuelle à la machine physique

Comme évoqué précédemment dans la section, les actions des humains et des machines sont étroitement liées dans le cadre évolutif de l'interaction. Les actions humaines se caractérisent par un engagement perceptuel et des mouvements intentionnels, où les entrées sensorielles et les processus cognitifs se mêlent à des gestes et une communication délibéré pour susciter des réponses spécifiques de la machine. Les machines, quant à elles, sont dotées de perception artificielle et d'actions autonomes, interprétant les entrées données des humaines via des

capteurs et des algorithmes pour anticiper les besoins et répondre de manière adaptative. La théorie de « La seconde interactivité », élaborée par M. Bret, E. Couchot et M.-H. Tramus[104], propose un changement de paradigme où les machines dépassent les simples échanges d'entrée-sortie pour devenir des participants actifs. Autrement dit, les machines ne sont plus considérées comme de simples dispositifs réactifs, mais comme des agents actifs, perceptuellement accordés, qui s'engagent dans un échange réciproque avec les (opérateurs) humains. Cette relation mutuelle crée une symbiose perceptuelle où l'intuition humaine et la spontanéité émotionnelle convergent avec les réponses adaptatives en temps réel des machines, produisant un dialogue improvisé et émergent qui permet aux deux entités de raffiner continuellement leurs interactions.

Tandis que les humains réagissent spontanément, guidés par l'intuition et les stimuli émotionnels, les machines, dotées de capacités d'adaptation en temps réel, contribuent activement en générant des réponses spontanées qui s'harmonisent avec le flux improvisé. Les actions improvisées, tant humaines que machiniques, émergent comme un domaine de créativité collaborative, se transformant en un phénomène d'interactions improvisées. Dans ce contexte, les actions autonomes des humains et des machines co-créent dans un jeu dynamique, chacune influençant la trajectoire créative de l'autre. La symbiose dynamique favorisée par ce type d'interaction se caractérise par une adaptation mutuelle, où les machines introduisent de nouveaux éléments ou séquences qui permettent aux humains d'explorer de nouvelles voies. Ainsi, nous comprenderons ce processus comme une entité unifiée où la perspective intégrative reconnaît que la fluidité des actions humaines est amplifiée par l'adaptabilité des machines, tandis que les actions autonomes des machines gagnent en nuance grâce à l'influence humaine.

Au départ, les recherches dans se sont principalement concentrées sur la distinction entre les gestes spontanés/créatifs des humains et les réponses adaptatives en temps réel des machines, les considérant comme des entités séparées. Cependant, une analyse plus approfondie montre que ces actions sont en

104. M.-H. Tramus, M. Bret, E. Couchot, « La seconde interactivité », in Arte e vida no século XXI, Tecnologia, ciência criatividade, ed. Unesp, Brésil, 2004.

réalité interdépendantes, s'influencent et se remodèlent constamment. Ainsi, l'interaction improvisée entre l'homme et la machine se révèle être un processus dynamique qui dépasse la simple juxtaposition de ses composants individuels, ouvrant de nouvelles perspectives pour la co-création artistique. Dans ce contexte, l'improvisation au sein de l'interaction homme-machine apparaît comme un élément clé.

Traditionnellement, l'improvisation des interactions homme-robot s'est fortement appuyée sur l'intégration de dispositifs portables[105] [106] [107] [108]. Cependant, bien que conçus pour minimiser les interférences, ces dispositifs affectent inévitablement le mouvement et le geste naturel d'un danseur et la présence scénique. Même de légères changements peuvent perturber la fluidité et l'expressivité d'une performance, entraînant inconfort, distraction et une expérience esthétique altérée. De plus, la présence de technologie portable lors d'une performance en temps réel peut nuire à l'expérience visuelle du public. Pour surmonter ces défis, notre système élimine le besoin de tels dispositifs, permettant à la danseurse de conserver leurs routines authentiques et leur concentration, préservant ainsi l'intégrité de la performance et l'harmonie visuelle globale.

En s'appuyant sur cette base, notre approche souligne l'importance de l'imprévisibilité et de la spontanéité, qui est l'un des éléments clés de la performance artistique. La nature dynamique des interactions en temps réel favorise un engagement plus profond du public, suscite des réponses émotionnelles plus fortes et permet aux danseurs et aux robots d'explorer des formes uniques d'expression corporelle. En privilégiant une chorégraphie fluide et réactive, cette interaction dynamique permet un échange organique entre la danseuse et le robot,

105. Jawale, Pratiksha Prakash, Ohol, Shantipal S. « Improvisation in Human–Robot Interaction Using Optimized Multimodal Operational Techniques ». Dans : *International Conference on Electrical and Electronics Engineering*. Springer. 2023, p. 403-413.
106. Cosentino, Sarah, Takanishi, Atsuo. « Human–robot musical interaction ». Dans : *Handbook of Artificial Intelligence for Music : Foundations, Advanced Approaches, and Developments for Creativity*. Springer, 2021, p. 799-822.
107. Cifuentes, Carlos A et al. « Human–robot interaction based on wearable IMU sensor and laser range finder ». Dans : *Robotics and Autonomous Systems* 62.10 (2014), p. 1425-1439.
108. Chen, Feiyu et al. « WristCam : A Wearable Sensor for Hand Trajectory Gesture Recognition and Intelligent Human–Robot Interaction ». Dans : *IEEE Sensors Journal* 19.19 (2019), p. 8441-8451. doi : 10.1109/JSEN.2018.2877978.

où chacun peut s'adapter et répondre aux mouvements de l'autre selon ses désirs. Ce concept non seulement enrichit l'esthétique et l'expressivité de la performance, mais réduit également les contraintes physiques, mettant en valeur l'importance artistique de l'improvisation spontanée.

Pour explorer plus en profondeur la question centrale—comment les systèmes interactifs autonomes créer un pont dynamique pour favoriser la co-création improvisée entre le robot humanoïde et la danseuse—nous avons conçu un système interactif basé sur les gestes, sans dispositif portable : *Gesture Dancing Humanoid Robot Interactive Framework (GD-HRIF)*. Spécialement développé pour cette performance, le GD-HRIF permet une interaction en temps réel sans nécessiter d'équipement portable, offrant ainsi au danseur la liberté de mouvement tandis que le robot réagit selon son propre processus décisionnel. Ce système permet au danseur d'exprimer librement ses mouvements durant la performance, pendant que le robot réagit à ses gestes en fonction de ses propres décisions. L'architecture globale du système sera détaillée dans la section III.2.3.

# Conclusion

Dans le deuxième chapitre, nous avons tracé un arc allant de paradigme d'activation interne en introduisant le concept taoïste de Qi, montrant comment l'improvisation peut émerger d'une mise en résonance avec un flux, jusqu'aux une performance dansée avec un entité artificiel virtuel. Cette approche d'expression corporelle improvisé a été développée à travers l'interaction improvisée avec la calligraphie et la forme sculpturale dans Boudda, et la co-création de « Le Mythe d'Immorta » avec l'Ecosystem Virtual Evolutif (E.V.E.) a révélé un mode symbiotique de co-évolution. Ici, les expression corporelle cultivés par le Qì de la danseuse influencent et sont en retour influencés par un partenaire numérique autonome, donnant naissance à une performance ni entièrement prédéterminé ni totalement spontanée, mais construite de manière dynamique dans un environnement performatif partagé

En s'appuyant sur cette base d'improvisation symbiotique avec des entités virtuelles, le troisième chapitre de cette thèse explorera l'intégration du geste corporel cultivé par le Qì avec des machines incarnées—en particulier des robots humanoïdes—dans le contexte du spectacle vivant. Après avoir illustré le principe du « Je ne danse jamais seul » dans sectionII.2.3.2 à travers des scénographies numériques réactives, nous nous intéressons ici à la manière dont cette idée de co-agence peut être élargie et transposée à des interactions avec de véritables partenaires robotiques, de taille humaine. Nous commençons par analyser les défis techniques et artistiques liés à l'utilisation de robots humanoïdes dans l'environnement incertain de la scène vivante. Ceux-ci incluent des questions de stabilisation physique, de réponse en temps réel, ainsi que la mise en place d'une

collaboration interdisciplinaire entre la metteuse en scène, l'ingénieur et la danseuse. Enfin, nous présenterons un nouveau système d'interaction gestuelle autonome, inspiré de l'apprentissage par renforcement, conçu pour adapter les principes de la seconde interactivité au champ de la danse robotique, ouvrant ainsi la voie à une nouvelle inter-actions de la co-création entre humains et machines.

# Troisième partie

# Dévéloppement et co-création pour une performance robotique dansée

# Chapitre III.1

# Enjeux de la performance interactive avec un robot humanoïde de taille humaine

## Introduction

Dans le contexte de la production artistique technique, en particulier dans le spectacle vivant, la collaboration entre divers professionnels — tels que les équipes d'installation technique, les concepteurs d'éclairage, les metteurs en scène, les musiciens, les interprètes et les artistes numériques — est essentielle. Au cours de la dernière décennie, un effort continu a été fait pour innover dans l'équipement de scène, l'éclairage et les pratiques de performance interdisciplinaires. Plus récemment, l'intégration de la technologie est devenue de plus en plus répandue dans le spectacle vivant, avec des innovations allant des projections sur grand écran à l'incorporation de machines sur scène. Parmi les différents types de machines, les robots retiennent de plus en plus l'attention. Cependant, la dynamique et la nature en constante évolution de l'environnement scénique, alimentées par les décisions artistiques et les variations inhérentes qu'elles impliquent, posent des défis majeurs lors de l'introduction de machines complexes, en particulier des robots. Ces robots, tels que les robots humanoïdes, sont généralement conçus et testés dans des

conditions de laboratoire contrôlées et appliqués dans un environnement de travail humain. Transférer leur fonctionnalité à une environnement scénique imprévisible et en temps réel pose des défis uniques. Les enjeux principaux incluent : i) les systèmes de stabilisation pour les robots humanoïdes lors des mouvements dansés ii) l'interaction en temps réel entre les danseurs et les robots iii) le *work-flow* collaboratif entre les metteurs en scène, les danseurs et les ingénieurs robotiques.

Dans le troisième volume de la thèse, nous explorerons d'abord les complexités du travail avec les robots, et plus spécifiquement avec le HRP-4[109], un robot conçu il y a presque une décennie, et comment nous avons adapté des outils basés en laboratoire pour la création artistique. Ensuite, nous présenterons la recherche et le développement d'un nouveau système d'interaction gestuelle autonome, GD-HRIF[110], qui nous permet d'explorer la seconde interactivité[111] dans le contexte de l'interaction homme-machine. De plus, nous décrirons le *work-flow* interdisciplinaire établi entre les outils techniques et la vision artistique lors d'une performance robotique dansée en temps réel sur scène, démontrant comment nous avons réinterprété et recréé la dynamique entre les robots et les danseurs, naviguant à la fois les limitations techniques et les possibilités de l'imagination. Enfin, nous réfléchirons et aborderons la question de savoir si le développement de la technologie est plus qu'un simple outil ? —Quel est le but et les possibilités de son développement pour la création homme-machine à l'ère numérique à travers nos corps vivants ?

109. Le robot HRP-4 a été produit en 2010 par Kawada Robotics en collaboration avec l'Institut National de Science et Technologie Industrielles Avancées du Japon (AIST). Grâce au partenariat avec le CNRS-LIRMM, nous avons la chance d'avoir accès à ce robot et de créer avec lui.

110. GD-HRIF signifie *Gesture Dancing Humanoid Robot Interactive Framework*, qui sera détaillé dans la section III.2.3 suivante.

111. Comme nous l'avons discuté dans la section I.1.3, la seconde interactivité implique que le système soit capable d'interpréter des entrées sensorielles, de s'adapter dans le temps et de générer de manière autonome des réponses.

## III.1.1 La stabilisation et les performances dansées

Avec deux caractéristiques singulières majeures des robots humanoïdes de taille humaine : leurs caractéristiques anthropomorphiques et la précision de l'exécution des mouvements humains, la marche ou ce que l'on appelle la locomotion humanoïde, reste, jusqu'à présent, un sujet de recherche critique dans le domaine de la robotique. En tant qu'être humain, on commence par apprendre à se tenir debout, puis à marcher en tombant des dizaines de fois. Le processus par lequel les humains apprennent à marcher est une interaction complexe entre le développement neural, la biomécanique et le contrôle sensorimoteur adaptatif. Pendant l'enfance, l'acquisition de la marche n'est pas une capacité innée instantanément perfectionnée ; elle est plutôt atteinte par des cycles répétés d'essais, d'erreurs et d'adaptation progressive. Des premières tentatives de se tenir debout aux premiers pas hésitants, le système nerveux central s'engage dans un processus de calibration des schémas d'activation musculaire, de raffinement du retour proprioceptif et d'intégration des informations visuelles et vestibulaires pour maintenir l'équilibre [112]. Dans Wolpert et al. [113] il est également indiqué que le développement des compétences locomotrices implique à la fois des mécanismes de contrôle anticipatif *(feedforward)* et de rétroaction *(feedback)*.

Le contrôle anticipatif, responsable de l'initiation des mouvements basés sur des modèles appris, fonctionne en tandem avec le contrôle de rétroaction, qui permet au corps de réagir aux perturbations inattendues. Ce double mécanisme est évident dans la manière dont les enfants apprennent à gérer l'instabilité. Initialement, lorsqu'un enfant fait un pas, le manque de mécanismes de rétroaction affinés conduit souvent à une perte d'équilibre et à une chute subséquente. Cependant, à chaque chute, le système nerveux affine son modèle interne de l'équilibre par la correction des erreurs, un processus que Bernstein et al. [114] a décrit comme une

112. Thelen, Esther. « Motor development : A new synthesis. » Dans : *American psychologist* 50.2 (1995), p. 79.
113. Wolpert, Daniel M, Kawato, Mitsuo. « Multiple paired forward and inverse models for motor control ». Dans : *Neural networks* 11.7-8 (1998), p. 1317-1329.
114. Bernstein, N. *The Co-ordination and Regulation of Movements*. Pergamon Press, 1967. isbn : 9780080119403. url : https://books.google.fr/books?id=mUhzjwEACAAJ.

« répétition sans répétition »[115]. Cette notion met en évidence la variabilité inhérente à l'apprentissage moteur, où chaque tentative est légèrement différente, permettant au cerveau en développement de peaufiner (fine-tune) ses commandes motrices. D'autre part, la stabilisation de la marche est réalisée grâce à l'activation coordonnée de plusieurs groupes musculaires et le timing précis de leurs contractions. Le centre de masse (CoM) du corps est géré dynamiquement par l'interaction entre les muscles des membres inférieurs, la stabilisation du tronc et les ajustements subtils des trajectoires des membres.

Des recherches en biomécanique ont démontré que même de légères variations des angles articulaires ou des forces musculaires peuvent avoir un impact significatif sur l'équilibre global[116]. Le système vestibulaire[117] joue également un rôle crucial en fournissant des informations en temps réel sur la position et le mouvement de la tête, essentielles pour maintenir l'équilibre pendant la locomotion. Cette intégration complexe des entrées sensorielles et des sorties motrices est non seulement cruciale pendant la phase d'apprentissage, mais aussi pour s'adapter à de nouveaux environnements ou se remettre de perturbations externes. Les principes observés dans la stabilisation humaine ont donc influencé la conception des systèmes de locomotion robotique.

Atteindre un équilibre dynamique chez les robots bipèdes[118] est un défi en raison de l'instabilité inhérente d'une structure à deux jambes. Inspirés par le contrôle moteur humain, les chercheurs ont développé des algorithmes de stabilisation qui imitent les stratégies adaptatives et prédictives du corps humain. Les stratégies adaptatives utilisent la rétroaction (*feedback*) pour ajuster les mouvements en temps réel, tandis que les stratégies prédictives, basées sur le

115. Il s'agit du fait qu'un même objectif moteur (ex. maintenir l'équilibre) est répété, alors que chaque exécution motrice diffère — même résultat fonctionnel, moyens variables.

116. Winter, David A. « Human balance and posture control during standing and walking ». Dans : *Gait & posture* 3.4 (1995), p. 193-214.

117. Le système vestibulaire est un système sensoriel qui contribue à l'équilibre et à l'orientation spatiale. Situé dans l'oreille interne, il détecte les mouvements et la position de la tête. Ce système envoie des signaux au cerveau concernant la position de la tête et du corps, permettant ainsi de maintenir l'équilibre, de stabiliser la vision lors des mouvements et de coordonner la posture. (Angelaki, Dora E, Cullen, Kathleen E. « Vestibular system : the many facets of a multimodal sense ». Dans : *Annu. Rev. Neurosci.* 31.1 [2008], p. 125-150)

118. Les robots bipèdes sont conçus pour imiter la marche humaines en utilisant deux jambes.

controle anticipatif (*feedforward*), anticipent les mouvements nécessaires pour maintenir l'équilibre. Un exemple est l'utilisation du modèle du pendule inversé linéaire (*LIPM — Linear Inverted Pendulum Model*)[119], qui simplifie la dynamique de la marche bipède en modélisant le corps comme une masse ponctuelle portée par une jambe de masse négligeable. Cette abstraction capture la dynamique essentielle de l'équilibre et permet de concevoir des contrôleurs visant à maintenir la stabilité en régulant la trajectoire du CoM. Le LIPM et d'autres stratégies de marche bipède reposent sur des modèles prédictifs et une adaptation en temps réel pour contrer les écarts par rapport à un chemin souhaité. Tout comme les humains ajustent leur démarche en fonction des retours sensoriels, les systèmes robotiques intègrent des capteurs qui fournissent des données continues concernant l'orientation, l'accélération et les forces de contact. Ces données sont ensuite utilisées pour calculer des actions correctives qui maintiennent l'équilibre du robot, même face à des perturbations ou à un terrain inégal, une surface irrégulière. La synergie entre le contrôle prédictif (dérivé de schémas de marche préprogrammés) et le contrôle adaptif (en réponse aux entrées sensorielles en temps réel) est centrale au succès de ces algorithmes de stabilisation. Nous examinerons les principales stratégies de stabilisation utilisées pour la locomotion bipède dans les parties suivantes, et nous avons choisi une stratégie et sommes capables de l'adapter à la performance robotique dansée pour le mouvement de danse du HRP-4.

Contrairement aux robots à roues, les robots bipèdes doivent maintenir la stabilité en contrôlant continuellement le CoM et en s'assurant que les forces dynamiques restent dans une zone sûre. Ce défi a incité au développement d'une gamme de stratégies de stabilisation utilisées pour la locomotion bipède. De l'adoption du contrôle du *zero moment point* (ZMP), des *Central pattern generators* (CPG)[120], du *Model predictive control* (MPC), du LIPM, aux avancées plus récentes en apprentissage automatique. Le contrôle du ZMP est l'une des méthodes les plus

119. Kajita, Shuuji et al. « The 3D linear inverted pendulum mode : A simple modeling for a biped walking pattern generation ». Dans : *Proceedings 2001 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Expanding the Societal Role of Robotics in the the Next Millennium (Cat. No. 01CH37180)*. T. 1. IEEE. 2001, p. 239-246.

120. Marder, Eve, Bucher, Dirk. « Central pattern generators and the control of rhythmic movements ». Dans : *Current biology* 11.23 (2001), R986-R996.

établies pour assurer la stabilité des robots bipèdes. Le ZMP est défini comme le point au sol où le moment net[121] dû à la gravité et à l'inertie est nul. En d'autres termes, cela signifie qu'à ce point, l'effet combiné de toutes les forces et moments agissant sur le robot est tel qu'il n'y a pas d'accélération rotationnelle. En pratique, maintenir le ZMP dans le polygone de support[122] empêche le robot de basculer. Le contrôle du ZMP ajuste continuellement le placement des pieds et la posture du corps pour s'assurer que la trajectoire du CoM du robot maintient le moment net équilibré. Bien que le contrôle du ZMP soit très efficace sur des surfaces planes et dans des environnements contrôlés, il peut devenir intensif en calcul et moins fiable lorsqu'il rencontre des terrains inégaux ou dynamiques ; les CPG sont des circuits neuronaux biologiques ou, en robotique, des oscillateurs couplés (parfois implémentés par des réseaux de neurones) capables de produire des sorties rythmiques sans nécessiter de signaux de synchronisation explicites. En robotique, les CPG sont mis en œuvre pour générer une démarche fluide et naturelles qui imitent la locomotion humaine. L'avantage des CPG réside dans leur capacité à s'adapter aux changements de vitesse et de direction, offrant ainsi une robustesse dans des environnements dynamiques. Cependant, bien que les CPG excellent à générer des mouvements rythmiques, ils peuvent avoir du mal à contrôler précisément les métriques de stabilité telles que le ZMP. De plus, des réglages approfondis est souvent nécessaire pour adapter les sorties du CPG à la dynamique spécifique d'un robot ; le MPC est une approche prospective qui utilise un modèle mathématique de la dynamique du robot pour prédire les états futurs et optimiser les entrées de contrôle sur un horizon temporel fini. Le MPC peut gérer des contraintes telles que les limites articulaires et les frontières du ZMP, générant des schémas de marche stables qui s'adaptent aux perturbations internes et externes. Malgré ses performances élevées et son adaptabilité, le MPC est exigeant en calcul et repose sur une représentation précise de la dynamique du robot. Cette

121. Le « moment net » fait référence au couple total agissant sur le système en raison des forces gravitationnelles et inertielles. Il représente l'effet de rotation combiné de ces forces autour d'un point donné. Lorsque le moment net est nul en un point spécifique du sol (le *zero moment point*, ou ZMP), cela signifie qu'il n'y a aucun mouvement de basculement, garantissant ainsi l'équilibre et la stabilité.
122. La zone sous les pieds du robot.

dépendance à la précision peut être un facteur limitant, en particulier dans des environnements imprévisibles. D'autre part, les stratégies basées sur l'apprentissage automatique, en particulier l'apprentissage par renforcement, ont ouvert de nouvelles voies pour la stabilisation de la marche bipède. Elles permettent aux robots d'apprendre des comportements de marche stables à partir de vastes ensembles de données et d'essais de simulation. Ces techniques basées sur les données ont démontré une adaptabilité et une robustesse impressionnantes, en particulier dans des environnements complexes et non déterministes. Cependant, le processus d'apprentissage nécessite généralement de grands volumes de données et des ressources de calcul considérables. De plus, la nature de boîte noire de nombreux modèles d'apprentissage automatique peut entraîner un manque d'interprétabilité, compliquant les efforts pour diagnostiquer et corriger les comportements instables.

Parmi les diverses techniques de stabilisation, le LIPM s'est révélé être une approche particulièrement attrayante pour atteindre une locomotion bipède stable. En découplant le contrôle de l'équilibre des détails plus fins de l'actionnement au niveau des articulations[123], le cadre LIPM permet un calcul rapide des trajectoires stables pouvant être mises en place en temps réel.

L'application pratique de la stabilisation basée sur le LIPM a été démontrée dans divers scénarios expérimentaux. En particulier, le robot humanoïde HRP-4 a été utilisé comme banc d'essai pour valider ces approches dans des conditions difficiles. Caron et al.[124], ont étendu la stabilisation traditionnelle basée sur le LIPM en incorporant un contrôleur d'admittance de tout le corps qui équilibre les stratégies d'effecteur final et de CoM. Cette méthode permet au robot HRP-4 d'ajuster dynamiquement ses forces de contact et ses mouvements articulaires, lui permettant de gérer la dynamique complexe de la montée d'escaliers. La validation

123. Cela signifie que le LIPM sépare « où doit aller le CoM » (le contrôle d'équilibre) des détails de « comment chaque articulation doit bouger » (actionneurs, couples, angles). Autrement dit, on calcule d'abord une trajectoire et stable du CoM, puis un contrôleur de niveau inférieur convertit cette trajectoire en mouvements articulaires.

124. Caron, Stéphane, Kheddar, Abderrahmane, Tempier, Olivier. « Stair climbing stabilization of the HRP-4 humanoid robot using whole-body admittance control ». Dans : *2019 International conference on robotics and automation (ICRA)*. IEEE. 2019, p. 277-283.

expérimentale a démontré l'efficacité de cette approche, car le robot a réussi à monter des escaliers industriels avec des marches de 18,5 cm de haut tout en maintenant une stabilité robuste dans des environnements structurés. Au-delà des environnements structurés comme la montée d'escaliers, la stabilisation basée sur le LIPM a également été adaptée pour atténuer les perturbations externes tout en assurant une locomotion continue. Dallard et al.[125] présentent une approche qui remplace les stabilisateurs conventionnels par un cadre MPC en boucle fermée (*closed-loop MPC*). Cette méthode ajuste continuellement le placement et le timing des pas en fonction des retours en temps réel de l'état du robot, y compris la position, la vitesse et le ZMP du CoM. En intégrant ces mécanismes de rétroaction directement dans le MPC, le système contre efficacement les perturbations externes, permettant au robot de maintenir une locomotion stable même sur des terrains inégaux et souples.

Dans notre performance robotique dansée, nous avons opté pour la stabilisation étendue basée sur le LIPM en incorporant un contrôleur d'admittance de tout le corps (*a whole-body admittance controller*), comme mentionné précédemment[126]. Ce choix a été motivé par la nécessité de gérer les complexités dynamiques inhérentes aux mouvements de danse tout en se produisant sur une scène. Le framework de whole-body admittance controller permet au robot d'adapter ses mouvements de manière fluide, assurant ainsi la stabilité pendant les séquences de mouvement de danse expressives et dynamiques. De plus, l'environnement de scène plate minimise les perturbations externes, ce qui en fait un cadre idéal pour exploiter les avantages de ces méthodes dans l'exécution des mouvements de danse.

En plus du système de stabilisation intégré utilisé lors des mouvements de danse pour le HRP-4, plusieurs outils spécialisés pour les robots humanoïdes sont également indispensables pour notre performance robotique dansée. Bien que le système de stabilisation assure que le robot maintienne son équilibre dans diverses

125. Dallard, Antonin et al. « Robust bipedal walking with closed-loop MPC : Adios stabilizers ». Dans : (2024).

126. Caron, Stéphane, Kheddar, Abderrahmane, Tempier, Olivier. « Stair climbing stabilization of the HRP-4 humanoid robot using whole-body admittance control ». Dans : *2019 International conference on robotics and automation (ICRA)*. IEEE. 2019, p. 277-283.

conditions, telles que la marche, les mouvements des mains ou de la tête, il ne prend pas en compte la complexité et la diversité des mouvements dansés. Pour permettre au robot d'exécuter des mouvements expressifs et dynamiques, nous intégrerons des outils industriels supplémentaires. La section suivante présente un aperçu des outils appliqués industriellement pour les robots humanoïdes. Plus tard, dans la section III.3.1, nous préciserons quels outils ont été choisis pour notre performance robotique dansée et et expliquerons les raisons de ce choix.

### III.1.2 Outils développés en scénario industriel

Dans le cadre des applications industrielles des robots humanoïdes, les sujets clés incluent, sans s'y limiter :

— le contrôle de tout le corps

— la manipulation habile et la téléopération

— la planification multi-contact

— la détection haptique avec la vision pour les tâches collaboratives

Le sujet du *whole-body control* utilisant la programmation quadratique contrainte est généralement étudié dans le cadre de la locomotion et de l'équilibre afin que les robots puissent opérer dans des environnements dynamiques. Des recherches telles que celles de Caron et al.[127] ont introduit un whole-body admittance controller qui intègre des stratégies end-effector[128] et de centre de masse, améliorant les capacités de montée d'escaliers du robot humanoïde HRP-4. De plus, des études comme[129] démontrent l'application du contrôle prédictif de modèle (MPC) en boucle fermée *(closed-loop)* pour atteindre une marche bipède robuste sans s'appuyer sur des stabilisateurs traditionnels.

Parallèlement aux avancées en locomotion, il y a également des progrès en manipulation habile et en téléopération, des travaux précurseurs combinant vision et *feedback* haptique, tels que ceux d'Agravante et al.[130] ont proposé un cadre pour faciliter les tâches collaboratives entre humains et robots humanoïdes. Ils ont développé un contrôleur hybride utilisant le asservissement visuel et le contrôle d'impédance, permettant des tâches nécessitant à la fois un *feedback* visuel et haptique. Le cadre a été validé par des expériences où un humain et le robot

127. Caron, Stéphane, Kheddar, Abderrahmane, Tempier, Olivier. « Stair climbing stabilization of the HRP-4 humanoid robot using whole-body admittance control ». Dans : *2019 International conference on robotics and automation (ICRA)*. IEEE. 2019, p. 277-283.

128. « end-effector strategy » fait référence à une approche de contrôle qui se concentre sur la gestion des mouvements et des interactions des parties terminales d'un robot

129. Dallard, Antonin et al. « Robust bipedal walking with closed-loop MPC : Adios stabilizers ». Dans : (2024).

130. Agravante, Don Joven et al. « Collaborative human-humanoid carrying using vision and haptic sensing ». Dans : *2014 IEEE international conference on robotics and automation (ICRA)*. IEEE. 2014, p. 607-612.

humanoïde HRP-2 transportaient conjointement une surface plane tout en empêchant un objet de tomber, démontrant la capacité du robot à participer activement à des tâches collaboratives plutôt que de simplement suivre le partenaire humain. De plus, les systèmes de téléopération ont évolué grâce à l'intégration de modèles de mouvement à secousses minimales, utiilisant un *recursive least-square filter* pour le mouvement du haut du corps. Ces systèmes prédisent également la fréquence des pas de l'utilisateur à l'aide d'un modèle de *deep learning*[131]. Comme démontré par Dallard et al.[132], cette approche permet d'atteindre une synchronisation complète entre les humains et les robots humanoïdes, ce qui nous a particulièrement captivés pour imaginer notre création artistique de performance robotique dansée. Ils ont développé un framework de contrôle de téléopération pour améliorer la synchronisation des mouvements entre un utilisateur et un robot humanoïde. Ce *framework* a été testé sur le robot humanoïde HRP-4, démontrant des mouvements synchronisés dans diverses directions de marche avec des mouvements simultanés des membres supérieurs, soulignant son potentiel dans les scénarios de téléopération.

D'autre part, dans le cadre de la construction aéronautique, Kheddar et al.[133] ont exploré le déploiement de robots humanoïdes pour les opérations d'assemblage dans leur espace de travail, où les plateformes robotiques traditionnelles rencontrent des défis d'accessibilité. Ils ont avancées en planification multi-contact, marche bipède, localisation et cartographie simultanées (SLAM), contrôle de tout le corps et mesures de sécurité dans les plateformes humanoïdes HRP-4 et TORO. Les robots ont réussi à effectuer l'assemblage de supports à l'intérieur d'une maquette de fuselage A350 à *full-scale*, démontrant le potentiel des robots humanoïdes dans les environnements de fabrication à grande échelle. D'autre part, Mansard et al.[134] introduisent le « Stack of Tasks » (SoT), mettant en œuvre une approche de

131. une méthode algorithmique en apprentissage automatique

132. Dallard, Antonin et al. « Synchronized human-humanoid motion imitation ». Dans : *IEEE Robotics and Automation Letters* 8.7 (2023), p. 4155-4162.

133. Kheddar, Abderrahmane et al. « Humanoid robots in aircraft manufacturing : The airbus use cases ». Dans : *IEEE Robotics & Automation Magazine* 26.4 (2019), p. 30-45.

134. Mansard, Nicolas et al. « A versatile generalized inverted kinematics implementation for collaborative working humanoid robots : The stack of tasks ». Dans : *2009 International conference on advanced robotics*. IEEE. 2009, p. 1-6.

cinématique inverse généralisée pour les robots humanoïdes. Ce *framework* permet un graphe d'exécution de nœuds de calcul, modifiable via un langage de script dédié, facilitant les schémas de contrôle hybrides essentiels pour les applications robotiques complexes. Le SoT a été efficacement intégré dans des systèmes middleware comme CORBA, améliorant l'adaptabilité des robots humanoïdes dans des environnements de travail collaboratifs.

Bien que divers outils et algorithmes développés pour des applications industrielles soient généralement accessibles, leur adaptation à la création artistique n'est pas encore aussi simple, et l'intégration de ces connaissances et savoir-faire dans le domaine de l'art reste largement inexplorée. En robotique, et plus particulièrement dans le développement des robots humanoïdes, la recherche de systèmes autonomes constitue un enjeu majeur, avec l'ambition de concevoir des entités capables d'expressions créatives autonome. Si recherches ont déjà exploré des formes d'autonomie dans l'interaction homme-robot[135 136 137 138 139], leur intégration dans des performances scéniques soulève des défis uniques, notamment la tension entre la nécessité de précision (et la reproductibilité) et la part d'imprévisibilité propre au spectacle vivant. À la croisée de la rigueur de la recherche scientifique et de la créativité imaginatif, nous introduirons dans la section suivante un nouveau système d'interaction gestuelle autonome pour robots humanoïdes : *Gesture Dancing Humanoid Robot Interactive Framework (GD-HRIF)*, que nous avons développé particulièrement pour notre performance robotique dansée. Ce système permet au robot humanoïde HRP-4 de réagir de manière dynamique et autonome aux mouvements et gestes de la danseuse dans un contexte scénique grâce à un système de reconnaissance gestuelle. En présentant des interactions autonomes en temps réel entre la danseuse et le robot humanoïde HRP-4 sur scène,

135. Aucouturier, Jean-Julien et al. « Cheek to chip : Dancing robots and AI's future ». Dans : *IEEE Intelligent Systems* 23.2 (2008), p. 74-84.
136. Beer, Jenay M, Fisk, Arthur D, Rogers, Wendy A. « Toward a framework for levels of robot autonomy in human-robot interaction ». Dans : *Journal of human-robot interaction* 3.2 (2014), p. 74.
137. Peng, Hua et al. « Robotic dance in social robotics—a taxonomy ». Dans : *IEEE Transactions on Human-Machine Systems* 45.3 (2015), p. 281-293.
138. Selvaggio, Mario et al. « Autonomy in physical human-robot interaction : A brief survey ». Dans : *IEEE Robotics and Automation Letters* 6.4 (2021), p. 7989-7996.
139. Stubbs, Kristen, Hinds, Pamela J, Wettergreen, David. « Autonomy and common ground in human-robot interaction : A field study ». Dans : *IEEE Intelligent Systems* 22.2 (2007), p. 42-50.

cette recherche propose un système de contrôle sur mesure conçu pour les performances artistiques et met en lumière les dynamiques sous-jacentes à la quête persistante d'une autonomie robotique dans les spectacles vivants.

# Chapitre III.2

# Recherche et développement des outils pour la co-création avec robot humanoïde

## Introduction

Malgré les avancées significatives dans les outils de stabilisation et de synchronisation entre humains et robots humanoïdes dans les applications industrielles, des progrès restent à faire dans l'utilisation et la personnalisation des contrôleurs pour la création artistique. Pour combler ce manque, nous proposons un système léger et interactif en temps réel, conçu pour intégrer harmonieusement des robots humanoïdes de taille humaine dans les performances dansée sur scène, dans le cadre du spectacle vivant.

Contrairement aux méthodes d'interaction existantes qui reposent sur des capteurs portables *(wearable sensors)*, par exemple Chen et al.[140] et Cifuentes et al.[141], ou des signaux musicaux prédéterminés, notre système, en revanche, intégré dans un contrôleur d'espace de tâches[142], permet au robot de réagir

140. Chen, Feiyu et al. « WristCam : A wearable sensor for hand trajectory gesture recognition and intelligent human–robot interaction ». Dans : *IEEE Sensors Journal* 19.19 (2018), p. 8441-8451.
141. Cifuentes, Carlos A et al. « Human–robot interaction based on wearable IMU sensor and laser range finder ». Dans : *Robotics and Autonomous Systems* 62.10 (2014), p. 1425-1439.
142. Le contrôleur d'espace de tâches (Bouyarmane, Karim, Kheddar, Abderrahmane. « On weight-prioritized multitask control of humanoid robots ». Dans : *IEEE Transactions on Automatic Control* 63.6

dynamiquement aux mouvements et aux gestes de la danseuse. Il génère ainsi des mouvements imprévisibles mais artistiquement significatifs, sans avoir besoin de capteurs montés sur le corps de la danseuse. Ce choix de conception pour ce système met en avant l'intention artistique derrière l'improvisation, illustrant qu'il ne s'agit pas simplement de générer des mouvements spontanés, mais plutôt d'une forme d'expression intuitive guidée par la perception.

Cette approche simplifie non seulement le système de contrôle pour les artistes, mais enrichit également la co-création improvisée entre la danseuse et le robot, améliorant l'interaction dynamique dans les performances en temps réel, et mettant en valeur le potentiel de la co-création dans l'interaction homme-robot dans le cadre de la co-création artistique et du développement scénique.

[2017], p. 1632-1647) est un composant du framework mc_rtc qui permet de contrôler les systèmes robotiques dans l'espace de tâches. Cela implique généralement de contrôler la position, l'orientation ou d'autres paramètres spécifiques aux tâches des effecteurs terminaux du robot ou d'autres points pertinents. Ce type de contrôle est souvent mis en œuvre à l'aide de la programmation quadratique (QP) pour gérer simultanément plusieurs objectifs et contraintes.

## III.2.1 L'objectif de créer un framework interactif

Ce système interactif est dédié à la performance dansée en temps réel. Dans le cadre de notre projet de recherche-création CECCI-H2M, nous cherchons à comprendre comment une relation dynamique entre humains et robots humanoïdes pourrait être établie. Le projet se concentre sur l'interaction entre la danseuse, le robot humanoïde HRP-4 et l'Écosystème Virtuel Évolutif (EVE). Nous avons développé une méthodologie, mené des expérimentations et réalisé des analyses esthétiques de cette co-création, en nous focalisant sur deux axes principaux :

1. Étude d'un écosystème virtuel évolutif et interactif servant de scénographie dynamique.
2. Interaction autonome avec un robot humanoïde dans un processus d'improvisation chorégraphique

Ma thèse se concentre sur le deuxième axe : l'interaction autonome avec un robot humanoïde dans un processus d'improvisation chorégraphique, et le premier axes constitue le sujet principal de la thèse de la Dr. Isadora TELES de CASTRO[143]. Nous avons donc commencé par développer un système interactif en temps réel personnalisé pour explorer le potentiel de la co-évolution dans les interactions humain-artefact. Ce système a ensuite été intégré au système de contrôle du robot humanoïde HRP-4.

La conception de ce système interactif doit être modulable et solide. Notamment, nous cherchons à nous affranchir de la dépendance conventionnelle aux dispositifs portables, comme capteurs portables dans l'interaction homme-robot, afin d'améliorer son application dans processus de création chorégraphique. De nombreux systèmes existants privilégient la précision dans la cartographie des mouvements et la synchronisation[144][145], ce qui, bien que

143. « Scénographie-personnage : Création d'artefacts virtuels autonomes pour les arts de la scène »
144. Kudoh, Shunsuke et al. « Entertainment robot : Learning from observation paradigm for humanoid robot dancing ». Dans : *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robots Syst. Workshop : Art Robots*. T. 7. 2008.
145. Nakaoka, Shin'ichiro et al. « Learning from observation paradigm : Leg task models for enabling

technologiquement impressionnant, néglige souvent les dimensions esthétiques et artistique de la performance. De plus, le système doit s'intégrer ou améliorer le processus de création artistique des performances dansée impliquant des robots humanoïdes. Enfin, cette conception valorise la perspective de l'improvisation dans le contexte de l'interaction homme-machine, un aspect crucial dans le spectacle vivant.

### III.2.1.1 Processus de création artistique d'une performance dansée

En plus de la conception d'un système technologique qui valorise la perspective de l'improvisation, il est essentiel que ce système puisse intégrer ou améliorer le processus de création artistique d'une performance dansée avec un robot humanoïde.

Traditionnellement, dans le processus de chorégraphie des performances dansées, la collaboration entre chorégraphes et danseurs implique deux phases principales : la découverte du mouvement ou du geste et le processus de création de la danse[146]. Contrairement aux structures hiérarchiques où la plupart des séquences de mouvements et des compositions sont décidées par les chorégraphes, ces deux phases suivent une approche qui privilégie davantage la collaboration. Pendant la première phase, le processus se déroule en deux sous-étapes : le développement du concept et l'exploration du mouvement; et pendant la deuxième phase, trois sous-étapes sont incluses : la structuration, la répétition et le raffinement, et la finalisation. Chaque phase est entourée d'un concept critique où les apports artistiques proviennent de tous les participants[147].

Le processus commence donc par le développement du concept. Autrement dire : la génération d'idées, où le chorégraphe et les danseurs explorent des thèmes,

a biped humanoid robot to imitate human dances ». Dans : *The International Journal of Robotics Research* 26.8 (2007), p. 829-844.

146. Minton, Sandra Cerny. *Choreography : a basic approach using improvisation*. Human Kinetics, 2017.

147. Des exemples notables de processus collaboratifs incluent le travail du chorégraphe Merce Cunningham (Copeland, Roger. *Merce Cunningham : the modernizing of modern dance*. Routledge, 2004), mentionné en I.1.2, qui a souvent utilisé des opérations aléatoires dans ses créations, introduisant ainsi des éléments d'imprévisibilité et de découverte partagée entre lui et ses danseurs. De même, la chorégraphe Trisha Brown (Rosenberg, Susan. *Trisha Brown : choreography as visual art*. Wesleyan University Press, 2016) impliquait ses danseurs dans des tâches d'improvisation afin de développer du matériel chorégraphique, mettant en avant l'importance de leur contribution dans le processus créatif.

des émotions ou des narrations qui façonneront la pièce. Cela se déroule généralement à travers des discussions de groupe, des inspirations visuelles ou des recherches sur des sujets culturels, historiques ou personnels spécifiques. Bien que le chorégraphe puisse proposer un concept initial, les danseurs partagent également leurs perspectives et interprétations, co-créant ainsi la fondation thématique. Certains chorégraphes utilisent des techniques de narration, des jeux d'improvisation ou des incitations écrites pour évoquer des idées créatives. D'autres peuvent permettre aux danseurs d'apporter des histoires personnelles qui résonnent avec eux, assurant que les matériaux : mouvement, action, gestes, etc., sont connectés aux identités des interprètes. Cette étape, pour le chorégraphe, consiste à évoquer plutôt qu'à diriger. Ils sont destinés à créer un environnement ouvert où les danseurs et eux-mêmes peuvent exprimer librement leurs pensées et émotions. Chorégraphe serve de guide, aidant les danseurs à affiner leurs idées et à les aligner avec le thème global. D'autre part, les danseurs s'engagent dans les discussions thématiques et offrent des interprétations basées sur le mouvement et le geste, en tant que collaborateurs actifs qui contribuent à façonner la fondation thématique.

Une fois le thème établi, l'étape suivante implique l'exploration du mouvement, générant le matériel de geste et de mouvement nécessaires, ce qui constitue une sous-étape clé pour la découverte du mouvement. Les danseurs participent à des sessions d'improvisation où ils explorent différentes expressions physiques du thème. Le chorégraphe peut fournir des incitations au mouvement, telles que « exprimez le sentiment de perte en utilisant uniquement le haut de votre corps » ou « bougez comme si vous résistiez à une force invisible ». Ces incitations défient parfois, tout en encourageant les danseurs à créer divers mouvements qui s'alignent avec leurs interprétations, et parfois leurs émotions. Certains chorégraphes utilisent des techniques comme l'Improvisation de Contact[148], où les danseurs répondent physiquement au poids des autres, ou l'Analyse du Mouvement Laban[149], qui aide les danseurs à explorer différentes qualités de

148. Paxton, Steve. « Contact improvisation ». Dans : *The Drama Review* 19.1 (1975), p. 40-42.
149. Davies, Eden. *Beyond dance : Laban's legacy of movement analysis*. Routledge, 2007.

mouvement telles que l'Espace, le Temps, le Poids et le Flux. Pendant cette phase de découverte du mouvement, le chorégraphe joue le rôle d'observateur, s'engageant dans un processus itératif d'évaluation, de recréation et d'intégration de nouveaux mouvements de danse qui résonnent avec le thème. Les danseurs, à leur tour, impliquent une observation attentive d'éléments inspirants comme la musique, les objets de scène ou la poésie dans la création de la chorégraphie. Ils contribuent avec du matériel original, modifient les mouvements et affinent leurs expressions corporelles en fonction des retours.

Après qu'une richesse de matériel de mouvement ait été générée, le ou la chorégraphe et les danseurs travaillent ensemble pour le façonner en une composition cohérente, un processus de création de danse. Cela implique d'abord de sélectionner les transitions déterminantes et de structurer le flux de la pièce. Cette étape est un équilibre délicat entre le maintien de la vision artistique et les faisabilités pratiques ; suggérer des modifications pour les transitions ou expérimenter avec différents arrangements spatiaux est également possible à cette étape de structuration pour améliorer la composition. Il est important de noter que les retours jouent un rôle crucial ici, avec un dialogue ouvert et une critique constructive façonnant la structure finale. À la fin de la structuration, l'équipe (y compris les chorégraphes et les danseurs) peut enregistrer les répétitions, regarder les séquences enregistrées et analyser quels éléments nécessitent des ajustements. Cette phase solidifie le cadre de la performance dansée tout en permettant des raffinements supplémentaires lors des répétitions.

Avec la structure en place, les danseurs affinent leurs mouvements, développent une profondeur émotionnelle et explorent différentes interprétations. Pendant cette étape, les danseurs continuent l'expérimentation et l'adaptabilité des mouvements, variant légèrement leurs mouvements en réponse à leurs émotions ou à l'énergie du moment. Certains chorégraphes introduisent l'improvisation en temps réel dans des structures définies, donnant aux danseurs la possibilité de faire des choix pendant la performance elle-même. Les chorégraphes sont là comme des mentors pour guider les danseurs à affiner leur technique, leur dynamique et leur présence sur scène

tout en permettant à leurs personnalités de briller. Cette étape implique également le raffinement des dynamiques de groupe, garantissant que les danseurs restent à l'écoute des mouvements et des intentions des autres. Le processus reste fluide, les danseurs ayant la liberté de proposer des ajustements de dernière minute ou de suggérer des raffinements pour améliorer la présentation finale.

La dernière étape du processus de création de danse est la finalisation, impliquant la solidification de la performance tout en préservant des éléments de spontanéité. Contrairement à la chorégraphie traditionnelle, où chaque détail est figé, les pièces centrées sur les danseurs intègrent souvent de la place pour l'interprétation individuelle et l'évolution organique du mouvement. La performance peut inclure des sections où les danseurs font des choix sur le moment, répondant au public et à l'espace. Pour le chorégraphe, cette phase nécessite de la confiance : confiance que les danseurs incarneront la pièce de manière authentique et prendront des décisions réfléchies en temps réel. Leur rôle passe de créateur à observateur, permettant aux danseurs de s'approprier pleinement le travail. Pour les danseurs, cette étape est à la fois passionnante et challenging, car ils doivent maintenir une précision technique tout en embrassant la liberté créative.

Cependant, à mesure que les chorégraphes collaborent avec des artistes numériques et des *creative technologists* afin de fusionner les registres physique et technologique, le processus de création chorégraphique a évolué vers une pratique interdisciplinaire. Le modèle de création, historiquement centré sur les danseurs, s'élargit : dès les premières étapes conceptuelles, chorégraphes, danseurs et artistes numériques s'engagent dans une idéation collective où mouvement, technologies et narration visuelle s'entrelacent. Les échanges portent notamment sur la manière dont les projections animées en temps réel ou d'autres dispositifs interactifs dialoguent avec le corps, ce qui suppose l'élaboration d'un vocabulaire partagé entre geste et technology numérique. À la différence de la chorégraphie conventionnelle, où les thèmes émergent principalement de l'improvisation du mouvement, l'intervention des artistes numériques et des *creative technologists*

introduit de nouvelles potentialités visuelles et interactionnelles (projections réactives, capteurs de mouvement, images générées par l'IA), redéfinissant à la fois les démarches créatives, la dramaturgie et la répartition des rôles au sein du processus de création chorégraphique.

En passant à l'exploration du mouvement, les danseurs expérimentent des incitations au mouvement qui prennent en compte les relations spatiales avec les éléments numériques, tandis que les *creative technologists* affinent la réactivité en temps réel, garantissant que les projections s'adaptent avec précision aux capteurs de mouvement ou aux systèmes de suivi en temps réel. Cette interaction pousse les danseurs à penser au-delà de leurs corps, s'engageant avec des espaces mécanique virtuels, des partenaires numériques et une scénographie fluide et en constante évolution. Dans la phase de structuration, les *creative technologists* travaillent aux côtés des chorégraphes pour affiner la synchronisation entre les danseurs et les projections, déterminant le degré d'improvisation par rapport aux séquences fixes. Certaines sections peuvent s'appuyer sur le mouvement généré par les danseurs dictant les réponses numériques, tandis que d'autres peuvent avoir des séquences pré-rendues nécessitant un timing précis de la part des danseurs. Les répétitions deviennent un terrain d'essai itératif, où le mouvement et les effets visuels doivent être continuellement recalibrés : les danseurs affinent leur capacité à répondre aux projections changeantes, et les *creative technologists* ajustent les algorithmes, les vitesses de rendu et la cartographie spatiale pour améliorer l'interaction entre les corps réels et virtuels. Enfin, en performance, la nature interdisciplinaire du travail se matérialise pleinement alors que les danseurs et les projections numériques coexistent en temps réel, nécessitant une communication fluide entre les danseurs, les chorégraphes et les *creative technologists*. Contrairement aux productions traditionnelles, où la chorégraphie est fixée et prévisible, ces performances intègrent souvent une adaptabilité en temps réel, permettant aux créations artistique virtuel de se transformer en réponse aux improvisations des danseurs ou même à l'interaction du public. Cette intégration de la technologie, de la danse et des effets visuels marque un changement radical dans la chorégraphie, élargissant

l'agence créative des danseurs au-delà de l'expression corporelle et dans un espace hybride où le mouvement influence, et est influencé par, le paysage technologique.

En poussant la réflexion plus loin, l'intégration de robots humanoïdes dans la performance chorégraphique dans le cadre du spectacle vivant introduit un autre niveau de complexité : un ensemble distinct de enjeu créatifs et techniques qui nécessitent une reconsidération de la chorégraphie à la fois d'un point de vue humain et machine. Comme les *creative technologists*, les robots deviennent des collaborateurs actifs dans le processus de création chorégraphique, mais contrairement aux projections virtuelles, ce sont des interprètes physiques avec des contraintes mécaniques qui nécessitent un langage corporel expressif unique.

Dès le départ, les chorégraphes, les danseurs, les *creative technologists* et les ingénieurs se réunissent pour envisager une performance où les robots humanoïdes ne sont pas de simples imitations du mouvement humain mais des entités artificielles avec leur propre vocabulaire corporel. Cette phase implique l'établissement d'un language partagé entre l'improvisation chorégraphique et les algorithmes robotiques, leur permettant d'interpréter de manière fluide les gestes observés et de s'intégrer dans des interactions improvisées avec les danseurs. La discussion ici s'étend, car elle inclut les limitations mécaniques des robots, telles que l'équilibre, la flexibilité des articulations et les délais du déclenchement, qui doivent tous être intégrés dans la vision chorégraphique.

Un défi majeur réside dans la stabilisation et l'équilibre. Au fur et à mesure que l'exploration du mouvement se déroule, les danseurs et les robots humanoïdes s'engagent dans une interaction intératif où la conception mécanique de ces derniers influence le vocabulaire du mouvement. Par exemple, alors que les danseurs humains peuvent lever une jambe ou exécuter des tours fluides sans effort, les robots nécessitent des séquences de mouvements soigneusement conçues pour maintenir leur stabilité. Les ingénieurs collaborent avec les chorégraphes pour développer des motifs de mouvement à la fois mécaniquement réalisables et artistiquement captivants. Des capteurs avancés et des systèmes réactifs en temps réel développé par des *creative technologist* permettent aux robots de reconnaître les

gestes humains, déclenchant des réponses préprogrammées ou même des mouvements improvisées. Ce processus itératif implique un recalibrage constant : les danseurs ajustent leurs mouvements pour tenir compte des dynamiques spatiales du robot, tandis que les algorithmes robotiques sont affinés pour améliorer la réactivité tout en maintenant l'équilibre pendant la performance.

Pendant la phase de la répétition et le raffinement, la chorégraphie est davantage affinée pour harmoniser les mouvements entre les danseurs humains et les robots humanoïdes. Les chorégraphes doivent déterminer combien d'improvisation peut être intégrée aux séquences programmées du robot. Contrairement aux projections numériques qui offrent une variabilité infinie dans la sortie visuelle, les robots nécessitent des paramètres fixes pour garantir des mouvements sûrs et stables. Le processus de répétition devient donc un terrain d'essai collaboratif, où la réactivité de chaque geste du robot et du danseur est soigneusement ajustée.

De plus, l'improvisation devient plus complexe lorsque des robots sont impliqués dans une performance chorégraphique. Alors que les danseurs humains s'appuient sur l'instinct et l'interprétation personelle, les robots doivent être équipés de systèmes de réponse autonomes qui leur permettent de reconnaître et de réagir aux gestes humains en temps réel. Dans Seo et al.[150], un système de génération de danse autonome pour un robot humanoïde de petite taille a été discuté. Un autre système proposé par Thörn et al.[151] médie également l'interaction entre un musicien et un robot bipède non anthropomorphique. Malgré ces défis, l'intégration de robots humanoïdes élargit considérablement les possibilités chorégraphiques en facilitant l'exploration de l'interaction homme-machine. Ces idées nous amènent à introduire le GD-HRIF(*Gesture Dancing Humanoid Robot Interactive Framework*) plus en détail dans les sections suivantes, où son rôle en tant que système interactif dans la performance dansée sera analysé de manière critique.

150. Seo, Ju-Hwan et al. « Autonomous humanoid robot dance generation system based on real-time music input ». Dans : *2013 IEEE RO-MAN*. IEEE. 2013, p. 204-209.
151. Thörn, Oscar, Knudsen, Peter, Saffiotti, Alessandro. « Human-robot artistic co-creation : a study in improvised robot dance ». Dans : *2020 29th IEEE International conference on robot and human interactive communication (RO-MAN)*. IEEE. 2020, p. 845-850.

## III.2.2 Interface du contrôle du HRP-4, mc_rtc

Avant d'entrer dans les détails du GD-HRIF, il est essentiel d'établir le contrôle fondamental qui soutient son fonctionnement. Le contrôle du robot humanoïde HRP-4 utilise le mc_rtc *framework*[152] en espace de tâche, une interface *open-source* conçue pour la simulation et le contrôle des systèmes robotiques. Le diagramme illustré dans la Fig.III.2.1 montre comment mc_rtc fonctionne comme une interface de contrôle unifiée, s'intégrant à diverses bibliothèques, interfaces et robots.

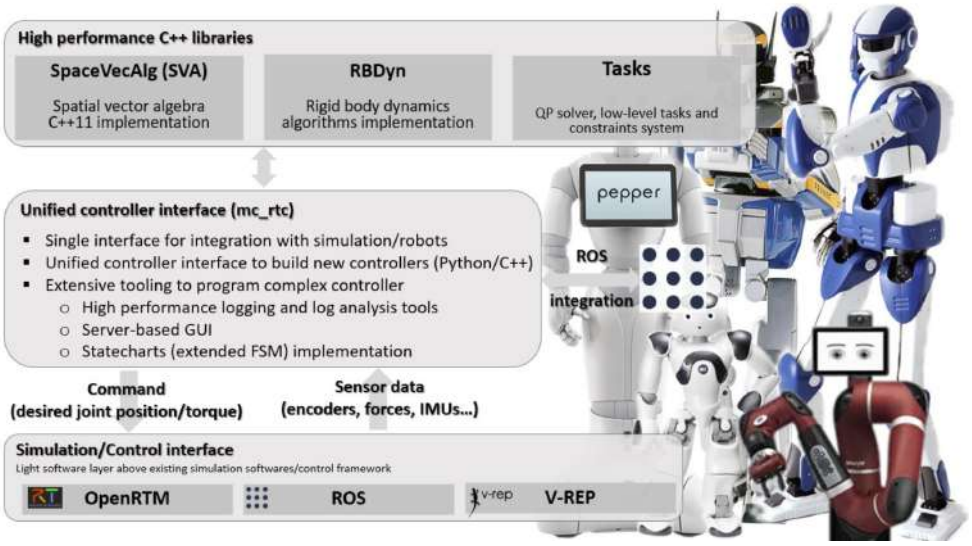



FIGURE III.2.1 – Le diagramme de mc_rtc. © URL : https://jrl.cnrs.fr/mc_rtc/tutorials/introduction/installation-guide.html

Le mc_rtc framework est construit sur C++[153] et ses bibliothèques pour gérer la manipulation des vecteurs spatiaux, la dynamique rigide des robots et la gestion des tâches, chacune servant un objectif distinct dans le contrôle et la simulation robotiques. La bibliothèque SpaceVecAlg (SVA)[154][155] implémentée en C++ fournit une implémentation robuste des vecteurs spatiaux pour gérer les représentations mathématiques des transformations et mouvements spatiaux en robotique. En d'autres termes, elle permet la manipulation des vecteurs spatiaux, tels que la description de la position, de l'orientation, de la vitesse et de l'accélération des composants robotiques dans l'espace tridimensionnel. Une autre bibliothèque,

152. URL : https://github.com/jrl-umi3218/mc_rtc
153. STROUSTRUP, Bjarne. *The C++ programming language*. Pearson Education, 2013.
154. URL : https://github.com/jrl-umi3218/SpaceVecAlg
155. FEATHERSTONE, Roy. *Rigid body dynamics algorithms*. Springer, 2014.

RBDyn[156], se concentre sur l'implémentation des algorithmes de dynamique des corps rigides. La dynamique des corps rigides implique l'étude du mouvement des corps rigides interconnectés et des forces qui les affectent, y compris le calcul des couples articulaires, des forces et des trajectoires de mouvement. Cette bibliothèque est essentielle pour calculer la dynamique des systèmes robotiques et pour simuler et contrôler le comportement physique des robots, garantissant qu'ils peuvent interagir avec leur environnement de manière contrôlée. La bibliothèque Tasks[157] englobe un ensemble d'outils pour gérer les tâches de bas niveau et les contraintes au sein des systèmes robotiques. Elle inclut un solveur de QP[158] conçu pour minimiser une fonction objective quadratique tout en respectant des contraintes linéaires, et c'est un outil d'optimisation couramment utilisé dans le contrôle robotique. La nature quadratique de la fonction objective permet de modéliser des *cost functions* complexes, telles que la minimisation de la consommation d'énergie ou des *joint torques* ; tandis que les problèmes de QP sont soumis à des contraintes linéaires, qui peuvent représenter des limites physiques comme les limites d'angle articulaire, les limites de vitesse ou les exigences d'évitement des collisions. Par exemple, dans la planification de mouvement, les solveurs de QP sont utilisés pour calculer des trajectoires optimales pour les robots. En minimisant une *cost functions* (par exemple, le temps, l'énergie), les robots peuvent se déplacer efficacement d'un point à un autre tout en respectant les contraintes. Un autre exemple est dans le calcul de la cinématique inverse, où le QP peut aider à trouver des configurations articulaires qui atteignent une position souhaitée de l'effecteur final, en optimisant pour la fluidité et le mouvement minimal des articulations. Il est à noter que le solveur de QP est particulièrement important dans le contrôle robotique, où plusieurs objectifs et contraintes doivent être équilibrés pour atteindre les comportements souhaités. La bibliothèque Tasks permet donc la spécification et l'exécution de tâches de contrôle complexes, garantissant que les robots peuvent accomplir les missions assignées tout en respectant les contraintes opérationnelles.

156. URL: https://github.com/jrl-umi3218/RBDyn
157. URL: https://github.com/jrl-umi3218/Tasks
158. Frank, Marguerite, Wolfe, Philip et al. « An algorithm for quadratic programming ». Dans : *Naval research logistics quarterly* 3.1-2 (1956), p. 95-110.

Au cœur de mc_rtc, une interface de contrôle unifiée, se trouve un cadre complet pour l'intégration des simulations et des robots. L'une de ses principales fonctionnalités est de fournir une interface unique qui simplifie le processus d'intégration, permettant aux développeurs de connecter sans effort leurs systèmes robotiques avec divers environnements de simulation et plateformes matérielles (par exemple, ROS[159] : mc_rtc_ros[160], OpenRTM : mc_openrtm[161], UDP[162] : mc_udp[163], VREP : mc_vrep[164], NAOQI : mc_naoqi[165], FRANKA : mc_franka[166], MuJoCo[167] : mc_mujoco[168 169]). Cette approche unifiée réduit la complexité du développement et du déploiement de chaque contrôleur robotique différent. Un composant clé est la classe *mc_control MCGlobalController*, qui agit comme un gestionnaire central pour les tâches de contrôle. Cette classe ne réalise pas directement le contrôle mais délègue la tâche à des objets dérivés de la classe *mc_control MCController*. Nous écrivons des contrôleurs en créant des classes qui héritent de *MCController*, en implémentant les fonctionnalités requises pour atteindre des objectifs de contrôle spécifiques. Cette structure permet des conceptions de contrôleurs modulaires et réutilisables, où différents contrôleurs peuvent être facilement échangés ou modifiés sans altérer l'architecture globale du système. Par exemple, pour implémenter un contrôleur de marche personnalisé, nous pourrions créer une nouvelle classe de contrôleur en héritant directement de *mc_control MCController*. Cela fournit une structure de base pour le contrôleur, puis spécifie les tâches et objectifs, tels que le maintien de l'équilibre et l'exécution de mouvements spécifiques. Enfin, implémentez un solveur de QP pour optimiser les

159. Quigley, Morgan et al. « ROS : an open-source Robot Operating System ». Dans : *ICRA workshop on open source software*. T. 3. 3.2. Kobe. 2009, p. 5.
160. URL : https://github.com/jrl-umi3218/mc_rtc_ros
161. URL : https://github.com/jrl-umi3218/mc_openrtm
162. Postel, Jon. *User datagram protocol*. Rapp. tech. 1980.
163. URL : https://github.com/jrl-umi3218/mc_udp
164. URL : https://github.com/jrl-umi3218/mc_vrep
165. URL : https://github.com/jrl-umi3218/mc_naoqi
166. URL : https://github.com/jrl-umi3218/mc_franka
167. Todorov, Emanuel, Erez, Tom, Tassa, Yuval. « Mujoco : A physics engine for model-based control ». Dans : *2012 IEEE/RSJ international conference on intelligent robots and systems*. IEEE. 2012, p. 5026-5033.
168. Singh, Rohan P, Gergondet, Pierre, Kanehiro, Fumio. « mc-mujoco : Simulating articulated robots with fsm controllers in mujoco ». Dans : *2023 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII)*. IEEE. 2023, p. 1-5.
169. URL : https://github.com/rohanpsingh/mc_mujoco

entrées de contrôle. Tout le processus de création d'un contrôleur personnalisé ne nécessite pas d'écrire un code étendu pour gérer les données des capteurs, interfacer avec le *hardware*, ni de mettre en œuvre manuellement la transition d'état des mouvements. mc_rtc *framework* gère essentiellement l'intégration avec différents environnements de simulation et matériels, permettant aux ingénieurs et *creative technologist* de se concentrer uniquement sur la logique de contrôle.

De plus, mc_rtc facilite le développement de nouveaux contrôleurs en utilisant Python[170] et C++, et offre un large éventail d'outils pour la programmation de contrôleurs complexes, y compris des outils de journalisation(*logging*) et d'analyse de journaux(*log*). Ces outils permettent aux ingénieurs de surveiller et d'analyser les performances de leurs contrôleurs en temps réel, fournissant des informations précieuses pour le *debugging* et l'optimisation. mc_rtc dispose également d'une interface graphique utilisateur (GUI) basée sur un serveur, qui améliore l'interaction et le contrôle des utilisateurs, comme illustré dans la Fig.III.2.2. Cette GUI permet aux utilisateurs de visualiser et de manipuler l'état de leurs systèmes robotiques, offrant ainsi une plateforme intuitive pour les tests et le développement. En outre, mc_rtc implémente des diagrammes d'état pour étendre la capacité de l'automate fini (*FSM*), permettant la conception de logiques de contrôle sophistiquées, capables de gérer des processus décisionnels interconnectés en série.

D'autre part, l'interaction entre mc_rtc et les systèmes robotiques est facilitée par une combinaison d'échanges de commandes et de données de capteurs. Le mc_rtc *framework* envoie des commandes aux robots, spécifiant les positions articulaires ou les *torques* souhaités, qui dictent les mouvements et actions des composants robotiques. Cet envoi de commandes garantit l'exécution précise du contrôle et permet aux robots d'accomplir leurs tâches comme prévu. Tandis que le *framework* transmet des commandes aux robots, il reçoit également des données provenant de leurs capteurs. Ces données incluent des encodeurs, des capteurs de force, des unités de mesure inertielle (IMU), etc. Elles fournissent un retour d'information en temps réel sur l'état du système robotique, permettant ainsi au

170. Van Rossum, Guido, Drake Jr, Fred L. *Python tutorial*. T. 620. Centrum voor Wiskunde en Informatica Amsterdam, The Netherlands, 1995.

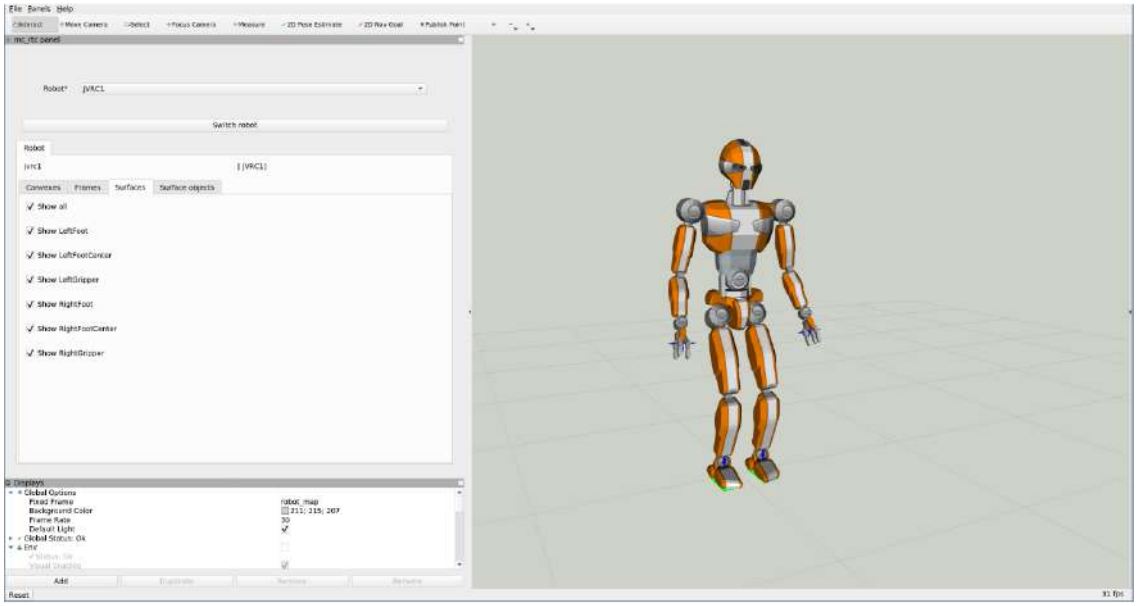


FIGURE III.2.2 – Le GUI de mc_rtc. © URL :https://jrl.cnrs.fr/mc_rtc/tutorials/tools/mc_surfaces_visualization.html

contrôleur de prendre des décisions éclairées et d'effectuer les ajustements nécessaires, comme illustré dans la Fig.III.2.3. En surveillant constamment ces données, mc_rtc peut s'adapter aux changements de l'environnement et maintenir des performances optimales. Il comprend également une interface de simulation/contrôle, qui agit comme une couche logicielle légère au-dessus des logiciels de simulation et des cadres de contrôle existants. Cette interface garantit la compatibilité avec des plateformes populaires telles qu'OpenRTM, ROS et V-REP, nous permettant ainsi de tirer parti des outils et ressources disponibles. En s'intégrant à ces plateformes, mc_rtc peut simuler et contrôler une large gamme de systèmes robotiques, des manipulateurs simples aux robots humanoïdes complexes. Enfin, l'intégration de ROS est un aspect clé de l'interaction de mc_rtc avec les robots, car elle facilite la communication et le contrôle avec les robots. Le système d'exploitation robotique (*Robot Operating System : ROS*) est un *framework* largement utilisé en robotique, fournissant un riche écosystème d'outils et de bibliothèques pour développer des applications robotiques et offrant une manière standardisée de gérer la communication entre les différentes parties du logiciel d'un robot. Au cœur de son fonctionnement, il repose sur un modèle de messagerie de *publish-subscribe*, où différents composants, appelés nœuds (*nodes*),

communiquent entre eux en publiant et en s'abonnant à des sujets. Cette architecture permet une conception modulaire, permettant aux développeurs de créer des composants réutilisables et interchangeables. En intégrant ROS, sa modularité renforce l'interface unifiée de contrôleur de mc_rtc, facilitant ainsi l'intégration fluide des stratégies de contrôle avec d'autres composants robotiques. Cette intégration nous permet de bénéficier de l'écosystème étendu de ROS, notamment de ses bibliothèques dédiées à la perception, à la navigation et à la manipulation, améliorant les capacités des contrôleurs basés sur mc_rtc, tels que la fusion de capteurs, la planification de trajectoire et la reconnaissance d'objets dans leurs projets. mc_rtc permet donc aux ingénieurs et *creative technologist* d'utiliser l'écosystème de ROS, améliorant les capacités et l'interopérabilité de leurs systèmes robotiques.

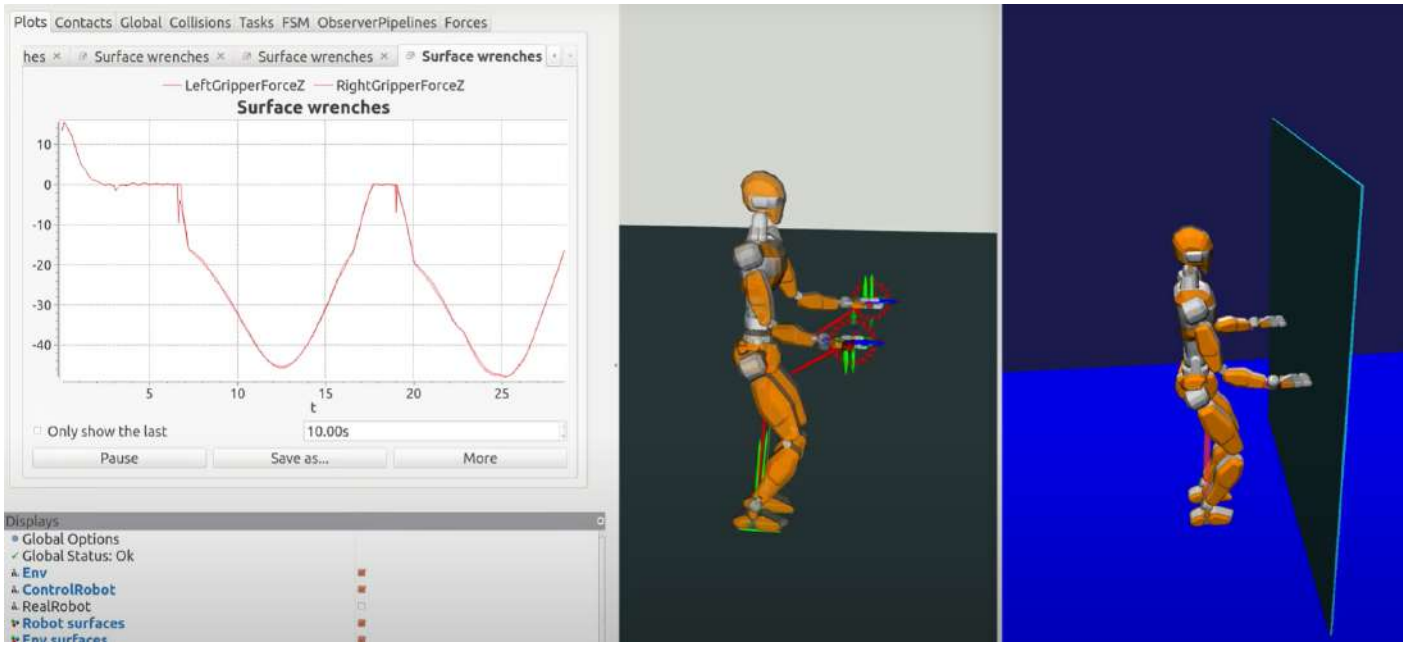



FIGURE III.2.3 – Le mc_rtc reçoit également des données provenant de capteurs du robot. © URL :https://jrl.cnrs.fr/mc_rtc/tutorials/samples/list-of-samples.html

## III.2.3 Architecture et développement d'un système interactif gestuel, GD-HRIF

Dans le mc_rtc *framework*, nous avons conçu une approche non-portable(*non-wearable*) pour un système interactif basé sur les gestes, spécialement destinée à la performance dansée en co-création homme-robot. Ce système, nommé *Gesture Dancing Humanoid Robot Interactive Framework (GD-HRIF)*, est illustré en Fig.III.2.4. Il s'agit d'un système interactif en temps réel qui utilise les données des articulations du squelette de la danseuse comme entrée. Ces données sont traitées par un système expert [171], informé par des mouvements artistiquement conçus, pour la classification des gestes. En outre, un contrôleur de tâches de posture [172] et un contrôle des mouvements interactifs sont utilisés pour traduire les séquences de création de danse du chorégraphe en mouvements interactifs du robot. Enfin, l'exécution est facilitée par l'intégration d'un contrôleur d'admittance du corps entier [173] étendu pour la stabilisation, mentionné en III.1.1.

Il s'agit d'un système interactif autonome qui permet au robot de répondre aux gestes de la danseuse en temps réel, sans nécessiter l'utilisation d'équipements portables, permettant ainsi au danseur d'exprimer librement ses mouvements pendant la performance, tandis que le robot réagit à ses gestes en fonction de son propre processus de prise de décision. L'architecture du système combine deux composants principaux :

— un système de reconnaissance visuelle, implémenté en Python

— un contrôleur robotique spécialisé, implémenté en C++

171. Un système expert (Liao, Shu-Hsien. « Expert system methodologies and applications—a decade review from 1995 to 2004 ». Dans : *Expert systems with applications* 28.1 [2005], p. 93-103) (en informatique) est un programme qui simule le raisonnement d'un expert humain dans un domaine spécifique. Il utilise une base de connaissances et un moteur d'inférence pour analyser des données et prendre des décisions

172. un contrôleur de tâches de posture fait partie du contrôleur de programme quadratique en espace de tâche(en III.2), qui sera mentionné plus en détail en III.3.1

173. Caron, Stéphane, Kheddar, Abderrahmane, Tempier, Olivier. « Stair climbing stabilization of the HRP-4 humanoid robot using whole-body admittance control ». Dans : *2019 International conference on robotics and automation (ICRA)*. IEEE. 2019, p. 277-283.

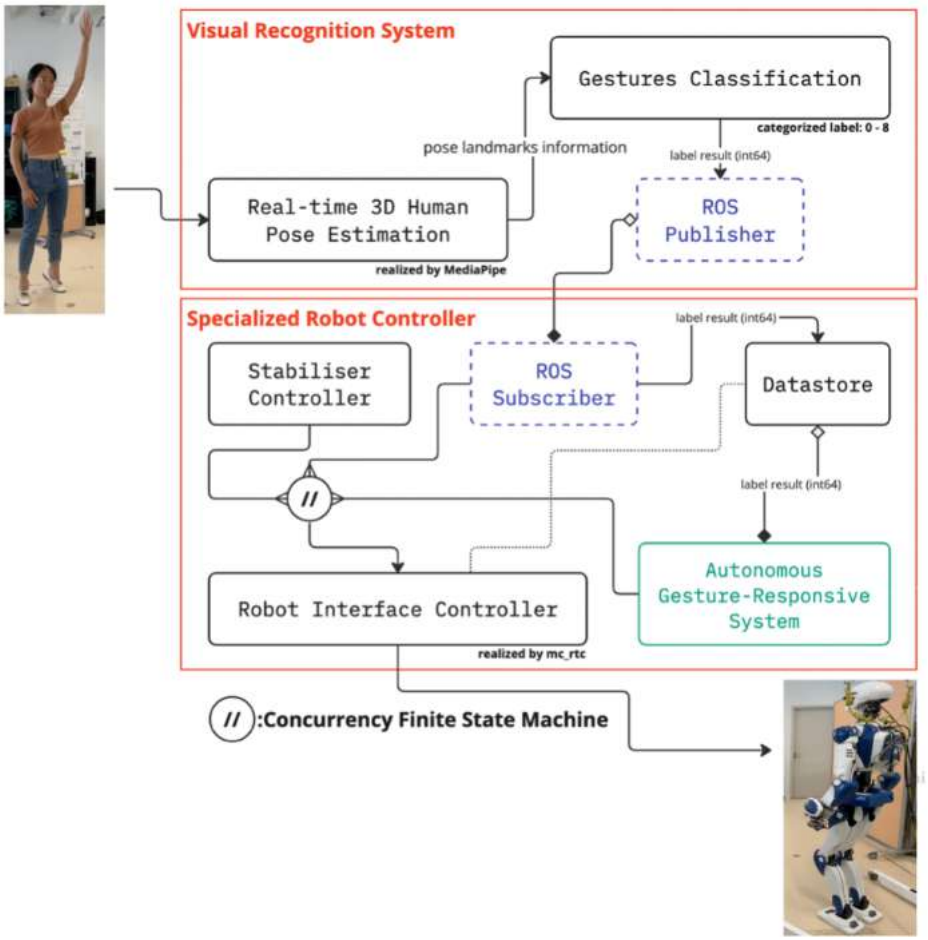



FIGURE III.2.4 – *Gesture Dancing Humanoid Robot Interactive Framework (GD-HRIF).*

En exploitant le framework ROS, nous l'utilisons comme intermédiaire de communication entre ces deux composants. Un *publisher* ROS au sein du composant visuel transmet les données classifiées, tandis qu'un *subscriber* ROS au sein du contrôleur robotique spécialisé reçoit et traite ces données.

### III.2.3.1 Système de reconnaissance visuelle du robot

Nous avons implémenté notre système de reconnaissance visuelle en utilisant la bibliothèque MediaPipe Pose Landmarker[174], pour offrir une solution de *deep*

174. LUGARESI, Camillo et al. « Mediapipe : A framework for building perception pipelines ». Dans : *arXiv preprint arXiv :1906.08172* (2019).

*learning*[175] pour l'estimation de la pose humaine[176] via la caméra ZED 2[177] installée sur le robot HRP-4, comme illustré dans la Fig.III.2.5. À partir des images RGB en temps réel du danseur capturées par la caméra, la pose corporelle 3D complète est estimée par BlazePose[178], comme illustré dans la Fig.III.2.6. Cette estimation repose sur MediaPipe Pose, qui propose trois configurations de modèles : *Lite, Full et Heavy*. Le modèle *Lite* est optimisé pour les applications à faible latence, adapté aux appareils mobiles mais avec une précision réduite. Le modèle *Full* offre un équilibre entre efficacité computationnelle et précision, idéal pour les applications en temps réel nécessitant une estimation fiable de la pose 3D. Enfin, le modèle *Heavy* fournit la meilleure précision mais au prix d'une demande computationnelle accrue, le rendant plus adapté au traitement hors ligne ou aux environnements de calcul haute performance.

Nous avons choisi le modèle *Full* pour sa capacité à capturer efficacement les mouvements complexes et dynamiques de la danse, garantissant une estimation robuste et précise de la posture corporelle tout en maintenant des performances en temps réel. La pose corporelle détectée la plus proche du centre de l'écran et de la caméra est sélectionnée. Si plusieurs personnes sont présentes, celle la plus proche de la caméra est choisie grâce aux informations de profondeur fournies par le modèle GHUM[179].

Parmi les 33 points de repère corporels estimés, nous avons sélectionné les informations de position de 6 points de repère seulement, en raison de leur

175. *deep learning* est une branche de l'apprentissage automatique qui utilise des réseaux de neurones multicouches pour simuler le pouvoir décisionnel complexe du cerveau humain. Il est utilisé, par exemple, pour permettre aux systèmes de reconnaissance visuelle d'effectuer l'estimation de la pose humaine.

176. L'estimation de la pose humaine est une technique de *computer vision* qui consiste à détecter et suivre la position ainsi que l'orientation des points clés du corps humain, tels que les articulations et les membres, à partir d'images ou de séquences vidéo.

177. La ZED 2 est une caméra stéréo conçue pour des applications avancées de détection de profondeur et d'intelligence spatiale. Développée par *Stereolabs*, elle intègre la vision stéréoscopique avec des réseaux de neurones afin de reproduire une vision proche de celle de l'humain, permettant une perception de la profondeur de 0,2 à 20 mètres. Cette caméra est équipée de divers capteurs, dont un IMU, un baromètre, un magnétomètre et des capteurs de température.

178. Bazarevsky, Valentin et al. « Blazepose : On-device real-time body pose tracking ». Dans : *arXiv preprint arXiv :2006.10204* (2020).

179. Xu, Hongyi et al. « Ghum & ghuml : Generative 3d human shape and articulated pose models ». Dans : *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. 2020, p. 6184-6193.

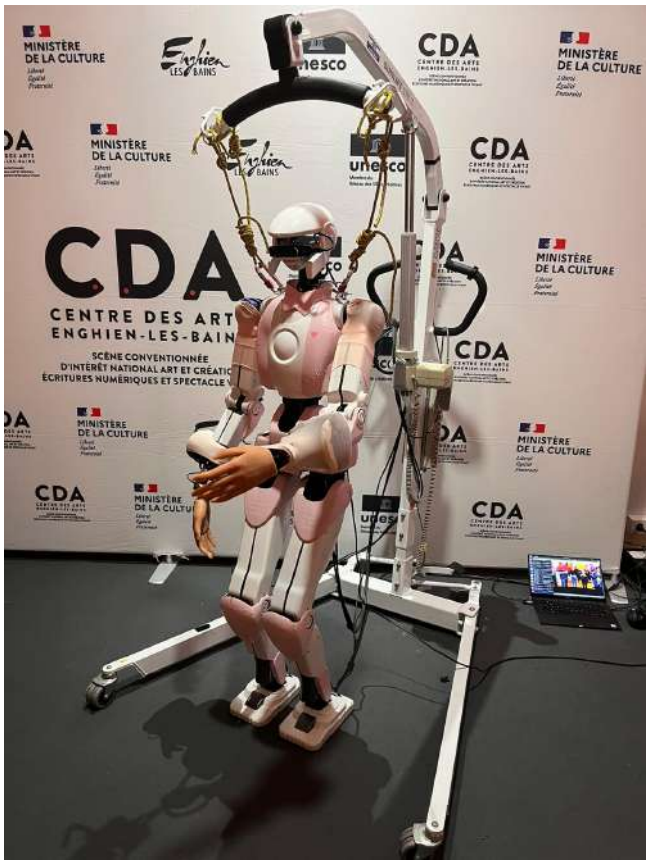



FIGURE III.2.5 – La caméra ZED 2 installé sur le robot HRP-4.

visibilité lorsque la caméra (installée sur la tête du robot) se déplace pendant la performance. Ces points de repère garantissent que les mouvements de la danseuse sont capturés de manière fiable, même lorsque la danseuse est proche du robot. Les indices de ces points de repère sont 7, 8, 11, 12, 15 et 16, comme montré dans la Fig.III.2.7, pour être utilisés plus tard dans le classificateur de gestes.

Un total de neuf classes de gestes sont définies, avec des informations sémantiques fournies dans le Tableau.III.2.1. Ces données d'estimation de la pose humaine sont ensuite soumises à un système de classification de gestes à neuf classes, fonctionnant sur des modèles de perceptron multicouche (MLP) basés sur la distance. Nous notons les informations des articulations squelettiques 3D en entrée comme $P$ (points de repère corporels extraits par BlazePose), et ses caractéristiques [180] de transformation non linéaire comme $D$. Ici, $P = (p_1, p_2, p_3, p_4, p_5, p_6)$, où chaque $p_i \in \mathbb{R}^3$ représente

180. caractéristique désigne une propriété mesurable ou un attribut distinctif extrait de données. Ils sont cruciales pour des tâches telles que la reconnaissance d'objets, la détection de visages ou le suivi de mouvements, car les features permettrait aux systèmes de vision par ordinateur de comprendre et d'interpréter le contenu visuel de manière similaire à la perception humaine.




FIGURE III.2.6 – La pose corporelle 3D complète est estimée par BlazePose. © URL :https://research.google/blog/on-device-real-time-body-pose-tracking-with-mediapipe-blazepose/

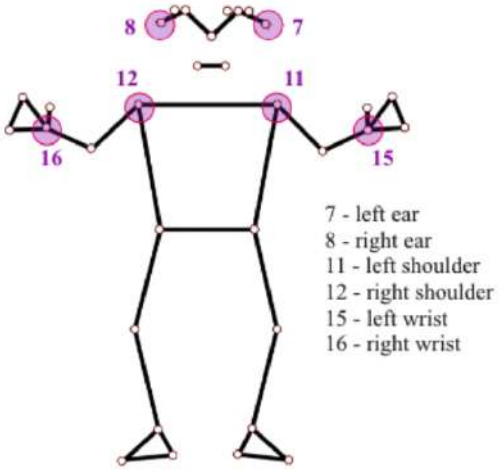



FIGURE III.2.7 – Les six positions de pose corporelle 3D sélectionnées de la danseuse.

des informations de position, avec des indices correspondant aux points de repère de pose corporelle sélectionnés $7, 8, 11, 12, 15$ et $16$ respectivement.

Nous définissons également $D = (d_1, d_2, d_3)$, où chaque $d_i$ est la transformation de la position brute en distance, définie comme :

$$d_1 = p_{4,y} - p_{5,y}, \quad d_2 = p_{3,y} - p_{4,y}, \quad d_3 = p_{3,y} - p_{6,y} \tag{III.2.1}$$

Les $P$ et $D$ sont ensuite concaténés en une caractéristique combinée $X = (P, D)$.

Neuf modèles MLP distincts sont appliqués à $X$, chacun avec une fonction d'activation différente, retournant la probabilité d'une classe de geste.

Le classificateur de gestes, noté $S(X)$, comprend un ensemble de MLP pour chaque type de geste :

TABLE III.2.1 – Les neuf classes de gestes conçues par la chorégraphe et metteuse en scène

| Classe de geste | Signification sémantique conçue par le chorégraphe | Nom de la classe |
|---|---|---|
| 1 | Ascendance de l'euphorie : indique le triomphe, la victoire ou la célébration. | élévation de la main droite |
| 2 | Salutation vigilante : représente la préparation et l'attention. | élévation de la main droite à hauteur de taille |
| 3 | Balise guidante : éclaire le chemin à suivre et signale la direction. | élévation horizontale de la main droite |
| 4 | Reverence aspirante : reflète la révérence et l'aspiration aux rêves. | élévation de la main gauche |
| 5 | Étreinte soutenante : évoque le soutien et la bienveillance. | élévation de la main gauche à hauteur de taille |
| 6 | Invitation inclusive : indique une invitation ouverte, favorisant l'inclusivité et l'engagement. | élévation horizontale de la main gauche |
| 7 | Inclinaison de curiosité : signifie la curiosité et l'attention | tête inclinée vers la droite |
| 8 | Pause contemplative : incline en réflexion, encourageant l'introspection. | tête inclinée vers la gauche |
| 9 | Unité : célèbre la joie partagée | élévation des deux mains |

$$[S_1(X), S_2(X), ..., S_9(X)] \tag{III.2.2}$$

La probabilité de chaque geste, $S_i(X)$, est dérivée par une fonction de traitement incluant des opérations linéaires et non linéaires, définie comme :

$$S_i(X) = \varphi_i(W_i \circ X + \beta_i) \tag{III.2.3}$$

où $\varphi_i$ est une variante de ReLU [181] ; $W_i$ sont les paramètres adaptés au $i$-ème geste ; et $\beta_i$ est un terme de biais ajustant la sortie de la transformation linéaire avant l'application de la fonction d'activation.

La classification finale du geste observé de la danseuse, $c$, est déterminée en sélectionnant le geste associé à la probabilité la plus élevée, définie comme :

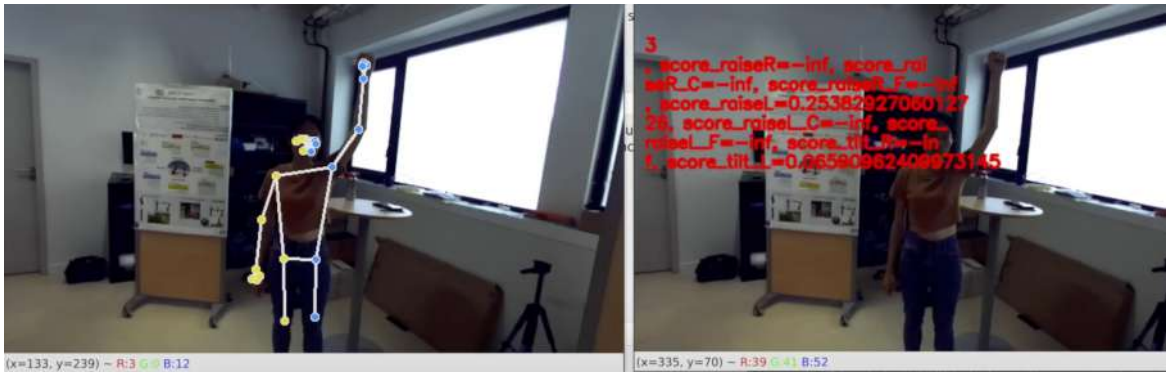
$$c = \arg\max_i S_i(X) \tag{III.2.4}$$

La classification à neuf classes est ensuite effectuée et produit un entier de 0 à 8, montré dans la Fig.III.2.8, qui sert d'entrée pour les étapes suivantes du contrôleur de mouvements interactifs spécialisés du robot.

181. ReLU(Rectified Linear Unit) est une fonction d'activation couramment utilisée dans les réseaux de neurones artificiels, en particulier dans les réseaux de neurones profonds. Elle est définie mathématiquement comme suit : $ReLU(x) = max(0, x)$ ; Cela signifie que pour une entrée x , la fonction ReLU renvoie $x$ si $x$ est positif, et 0 sinon.



(a) ex. Classe 3 (montrée par le chiffre 2, car la classification se fait de 0 à 8) : élévation horizontale de la main droite.



(b) ex. Classe 4 (montrée par le chiffre 3, car la classification se fait de 0 à 8) : élévation de la main gauche.

FIGURE III.2.8 – La classification à neuf classes.

### III.2.3.2 Contrôle des mouvements interactif autonome du robot à l'aide d'une *policy function*

Le contrôle des mouvements interactifs définit une fonction de politique pour déterminer les actions artistiques optimales du robot en fonction des gestes observés de la danseuse. L'image en temps réel du geste de la danseuse est interprétée en un entier discret par le classificateur de gestes, représentant une étiquette de classe dans la plage $\{1, 2, \ldots, 9\}$, définissant ainsi l'espace d'observation $\mathbb{O}$. À un instant donné $t$, chaque séquence d'observation est une fenêtre glissante de taille 3 avec un pas de 2, notée $(c_{t-2}, c_{t-1}, c_t)$, où $c_t == i$ est un encodage one-hot de la classe $i \in \mathbb{O}$. Pour gérer efficacement la séquence de gestes observés en continu, nous appliquons une *weighted average* à chaque instant $t$, notée comme suit :

$$\bar{c_t} = 0.2c_{t-2} + 0.3c_{t-1} + 0.5c_t \tag{III.2.5}$$

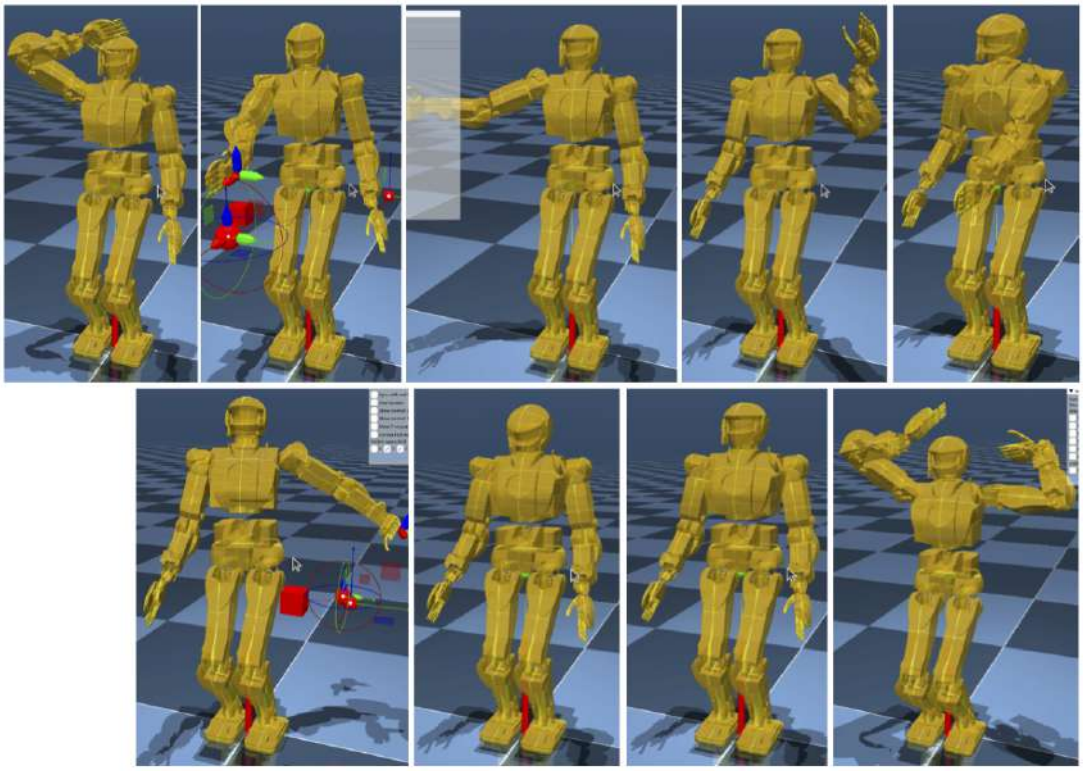


FIGURE III.2.9 – La séquence de mouvement du robot est conçue selon le processus de création chorégraphique du chorégraphe. Elle est représentée séquentiellement de gauche à droite et de haut en bas, illustrant respectivement $T_1$ à $T_9$.

L'espace d'action $\mathbb{A}$ est défini comme le produit cartésien de neuf séquences de mouvements distinctes $j \in \{1, 2, \ldots, 9\}$ des robots et de deux options de trajectoire [182], noté comme suit :

$$\mathbb{A} = \{(T_j, \mathrm{m}) \mid \mathrm{j} \in \{1, 2, \ldots, 9\}, \mathrm{m} \in \{\mathrm{BSpline}, \\ \mathrm{Exact\ Cubic\ spline}\}\},$$

où, $T_j$ représente les séquences de mouvements du robot conçues par le processus de création de danse du chorégraphe, établi à l'aide du contrôleur de tâche de posture, illustré en Fig.III.2.9, et $m$ désigne l'option de trajectoire.

Nous définissons ensuite une matrice de score $M$, où chaque élément $M_{i,j}$ représente le score de choisir l'action $a_j$ en réponse à l'observation $i$. Cette matrice

182. Une BSpline (Basis Spline) est une fonction définie par morceaux utilisant des bases polynomiales pour créer une interpolation lisse entre plusieurs points de contrôle ;Une Exact Cubic Spline est une spline cubique qui passe exactement par un ensemble donné de points de contrôle. Contrairement à BSpline, où la courbe est influencée par plusieurs points de contrôle mais ne les traverse pas nécessairement, l'Exact Cubic Spline garantit que la courbe passe par tous les points spécifiés.

de score quantifie la compatibilité de chaque action possible avec chaque geste observé, guidant la sélection de la réponse de mouvement optimale du robot. La *policy-function* $\pi : \mathbb{O}^3 \rightarrow \mathbb{A}$ est définie comme suit :

$$\pi(\bar{c_t}) = a^* := \arg\max_{a_j \in \mathbb{A}} \quad \bar{c_t}^T \circ M \tag{III.2.6}$$

où, pour chaque étape temporelle $t$, l'action optimale $a^*$ est déterminée par le score $\bar{c_t}$.

Le rôle central de ce système interactif aux gestes autonomes réside dans le fait de doter le robot de ses propres capacités de prise de décision, permettant ainsi à la danseuse d'interagir avec le robot par des expressions coporelles improvisés. En d'autres termes, chaque mouvement préconçu du robot est dynamiquement associé au geste classifié de la danseuse à l'aide d'une fonction de politique personnalisée, en tenant compte des informations de séquence temporelle. Ainsi, sans nécessiter de dispositifs portables ou d'équipements externes, le système classifier les gestes de la danseuse en 9 catégories distinctes. Le robot réagit ensuite en conséquence, basé sur la décision formulée par le système interactif.

Lors du déploiement du système, des observations ont mis en évidence des instances où le robot imite les actions de la danseuse. De manière intrigante, le système a également produit des instances où le robot répond par des mouvements opposés ou distinctement différents, ajoutant un élément d'imprévisibilité et d'intrigue artistique. Au-delà de son application dans les performances robotiques, ce système GD-HRIF : *Gesture Dancing Humanoid Robot Interactive Framework*, témoigne d'un potentiel d'engagement avec le public, favorisant des expériences interactives avec le robot humanoïde dans un cadre d'installation, illustrée en Fig.III.2.10. En présentant l'intégration de GD-HRIF avec le robot humanoïde HRP-4 dans le contexte d'une performance dansée robotique, nous démontrons une forme potentielle d'interaction participative dans la co-création de




FIGURE III.2.10 – L'installation de GD-HRIF a eu lieu à l'accueil de CDA lors de l'ouverture de la saison 2023-2024.

performances en temps réel. La démonstration intégrant GD-HRIF lors de notre performance dansée robotique est illustrée en Fig.III.2.11.

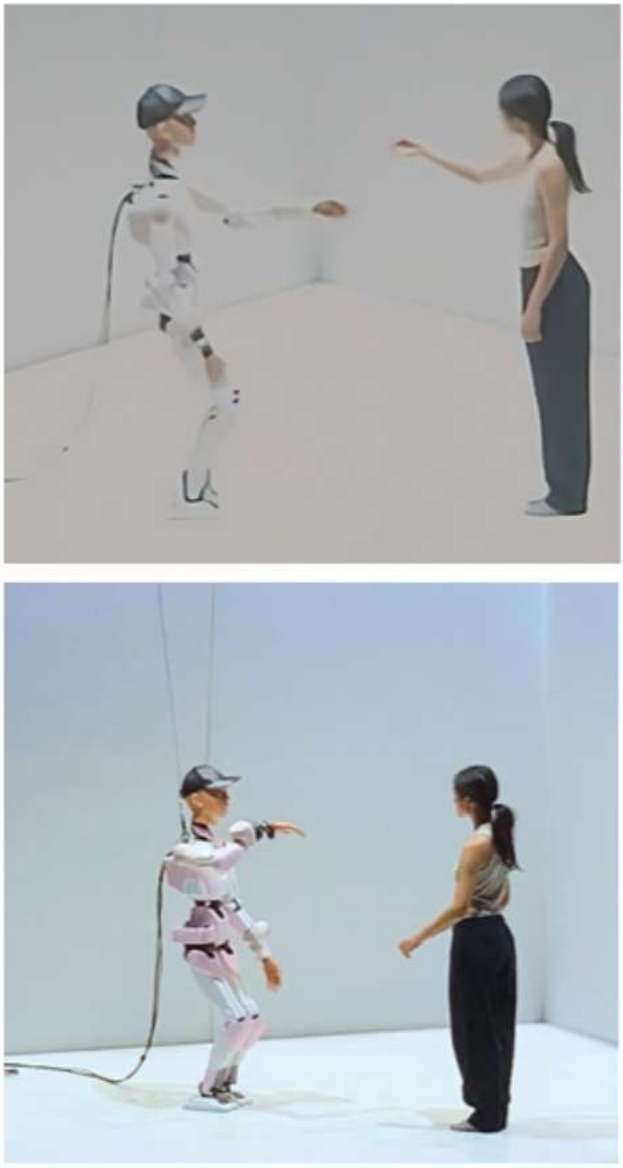


FIGURE III.2.11 – La démonstration intégrant GD-HRIF lors d'une performance.

# Chapitre III.3

# Mise en situation de l'outil : une performance dansée avec un robot humanoid HRP-4

## Introduction

Inspirés par le contexte de la pandémie de coronavirus et les implications de l'isolement social, nous avons créé une performance qui traverse les frontières temporelles entre le présent (2023) et un futur envisagé (2035). Notre récit explore les thèmes de la solitude existentielle face aux menaces extérieures d'entités organiques, comme de nouveaux virus, contrastées avec le réconfort trouvé auprès d'entités artificielles. Notre dramaturgie se situe dans un futur imaginé où les avancées technologiques permettent d'accéder à des outils de haute technologie, tels que des robots sociaux humanoïdes, aussi facilement qu'à un téléphone aujourd'hui. À travers une exploration de la temporalité, notre recherche interroge le processus de co-création improvisée via des interactions avec des systèmes autonomes. Comment ces conversations temporelles contribuent-elles à l'interaction dynamique entre la danseuse et le robot humanoïde ? Ce dialogue dépasse les frontières disciplinaires et résonne avec la notion : « le passé, le présent

et le futur existent dans la constante présence du lieu »[183]. Nous imaginons que ce lieu crée un espace qui relie harmonieusement la pensée, le processus et l'inspiration, tous réunis dans une performance robotique dansée co-créative. Dans ce chapitre, nous illustrerons comment les outils technologiques s'intègrent à la co-création artistique sur scène, comment l'idée artistique émerge et quel processus de co-création a été impliqué pour réussir à présenter cette performance robotique dansée en temps réel devant environ 400 personnes.

183. La notion décrite par les Premières Nations australiennes, qui fait partie du thème de la conférence de ISEA 2024 (*29th International Symposium on Electronic Art*)

## III.3.1 Intégration des outils robotique dans la création artistique

En complément du système GD-HRIF mis en place, qui permet au robot humanoïde HRP-4 d'effectuer des mouvements interactifs, la dramaturgie, que nous allons la détailler plus tard en III.3.2.2, a servi de fil conducteur. La chorégraphe et la metteuse en scène ont conçu divers mouvements distincts pour le HRP-4. Pour les implémenter, nous avons développé plusieurs contrôleurs robotiques spécialisés en C++ au sein du *framework* open-source mc_rtc, permettant l'exécution des mouvements du robot humanoïde pendant la performance. Chaque contrôleur dérive de la même classe générale, permettant ainsi la personnalisation des fonctionnalités selon les besoins spécifiques. Dans le cadre de cette performance, nous avons intégré quatre types de contrôleurs distincts, chacun contribuant à l'orchestration des mouvements du robot humanoïde :

1. Contrôleur de tâches de posture : Organise les configurations précises des postures du HRP-4, impliquant un contrôle précis de ses huit segments corporels et 30 paramètres ajustables, comme indiqué dans le Tableau III.3.1.
2. Contrôleur de *Finite State Machine* : Utilise un modèle computationnel pour gérer les transitions entre différentes séquences de mouvements.
3. Contrôleur de stabilisation : Assure l'équilibre du robot pendant les mouvements.
4. Contrôleur de retargeting de capture de mouvement : Synchronise les mouvements entre l'humain et le robot humanoïde de la taille humain.

### III.3.1.1 Contrôleur de tâches de posture

Le contrôleur de tâches de posture est essentiel pour organiser les configurations précises des postures du robot HRP-4. Grâce à sa flexibilité, nous

| **Segments du corps** | **Axes de rotation** | **Gauche (G)/Droite (D)** |
|---|---|---|
| Hanche | Y, R et P | G et D |
| Genou | P | G et D |
| Cheville | R et P | G et D |
| Poitrine | P et Y | - |
| Cou | P et Y | - |
| Épaule | Y, R et P | G et D |
| Coude | P | G et D |
| Poignet | Y, R et P | G et D |

TABLE III.3.1 – Segments ajustables du HRP-4 dans le contrôleur des tâches de posture, où Y indique le Yaw, la rotation autour de l'axe vertical ; R indique le Roll, la rotation autour de l'axe longitudinal ; P indique le Pitch, la rotation autour de l'axe transversal.

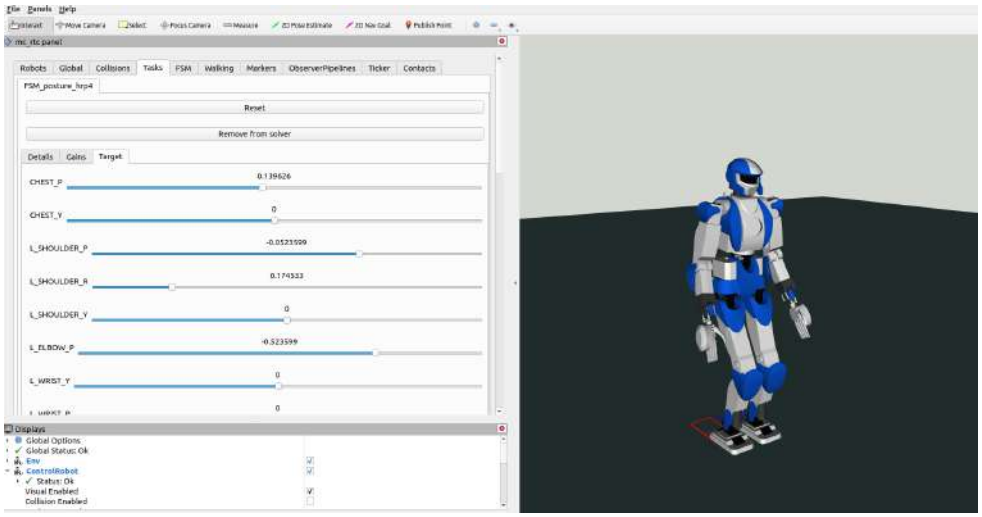
avons réalisé des simulations complètes dans MuJoCo[184][185] pour visualiser et chorégraphier les postures nécessaires à notre performance, comme illustré dans la Fig.III.3.1a,III.3.1b,III.3.1c. Cette étape nous aide à imaginer les mouvements que le HRP-4 pourrait réaliser, ce qui est crucial pour le processus de co-création de la performance avec les robots. Pour rationaliser le processus créatif et assurer la synchronisation de la chorégraphie esthétique, nous avons ensuite intégré un contrôleur de retargetting de capture de mouvement. Celui-ci permet de créer directement des séquences de mouvement du robot à partir des mouvements et des gestes de la danseuse, enregistrés via un dispositif portable. Nous aborderons les détails plus tard.

### III.3.1.2 Contrôleur de *Finite State Machine*

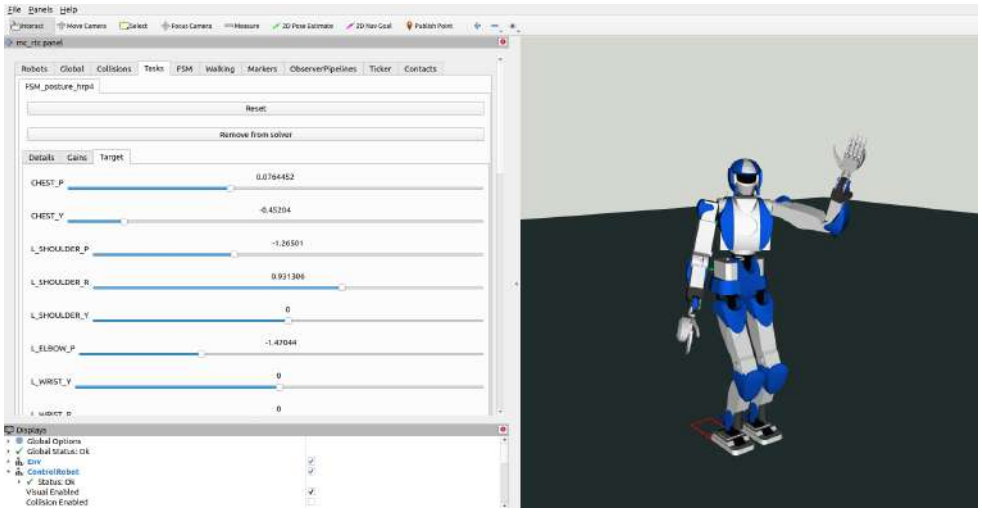
Le deuxième contrôleur est le contrôleur de *Finite State Machine (FSM)* utilise un modèle computationnel pour concevoir des systèmes capables d'exister dans un nombre fini d'états à tout moment. Visualisé comme un organigramme, chaque

184. TODOROV, Emanuel, EREZ, Tom, TASSA, Yuval. « Mujoco : A physics engine for model-based control ». Dans : *2012 IEEE/RSJ international conference on intelligent robots and systems*. IEEE. 2012, p. 5026-5033.

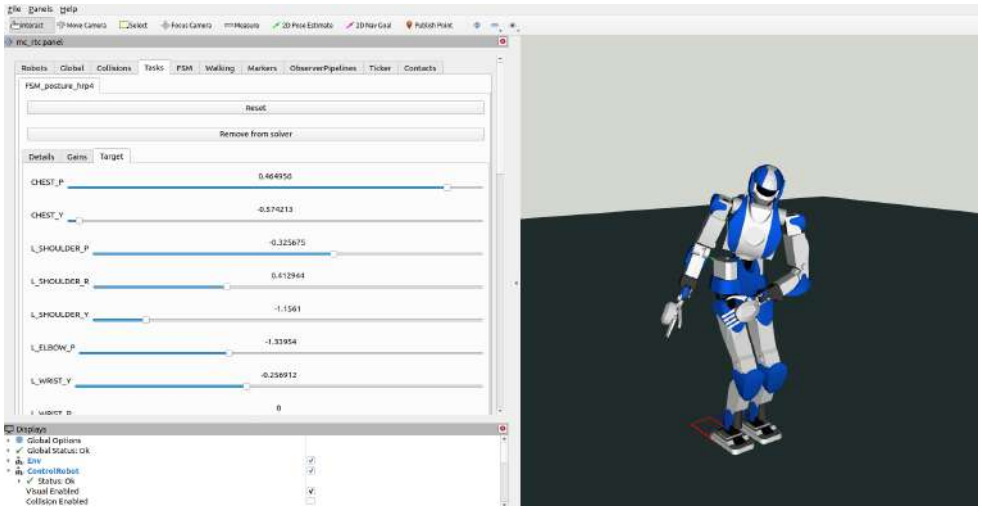
185. mc_mujoco (SINGH, Rohan P, GERGONDET, Pierre, KANEHIRO, Fumio. « mc-mujoco : Simulating articulated robots with fsm controllers in mujoco ». Dans : *2023 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII)*. IEEE. 2023, p. 1-5). URL : https://github.com/rohanpsingh/mc_mujoco



(a)



(b)



(c)

FIGURE III.3.1 – Le contrôleur de tâches de posture.

nœud représente un état distinct, et les arêtes dirigées indiquent des transitions déclenchées par des entrées spécifiques, comme montré dans la Fig.III.3.2.

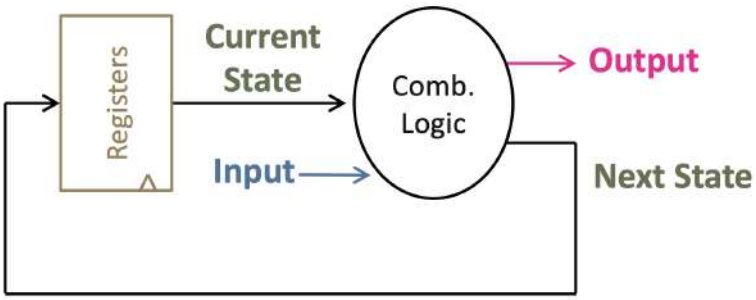



FIGURE III.3.2 – *Finite State Machine (FSM)*

FSM sont largement utilisées dans divers domaines, notamment en informatique et en robotique, pour modéliser le comportement des systèmes qui doivent répondre à des séquences d'événements ou d'entrées. Essentiellement, les FSM permettent d'organiser et de gérer des tâches complexes en les décomposant en étapes plus petites et gérables, chacune régie par son propre ensemble de règles et de réponses. Dans le *framework* mc_rtc, le contrôleur de *Finite State Machine* sert d'architecture fondamentale pour orchestrer les transitions entre différentes séquences de mouvements, un composant crucial de notre performance chorégraphique. La FSM est largement utilisée en programmation et s'appuie sur le formalisme des diagrammes d'états, qui introduit deux principes fondamentaux : la hiérarchie pour les diagrammes d'états imbriqués et la concurrence pour l'exécution simultanée de plusieurs états. En exploitant la structure hiérarchique de la FSM, notre performance chorégraphie diverses séquences de mouvements de manière consécutive. De plus, la structure de concurrence facilite l'exécution simultanée de mouvements. Par exemple, lors de l'exécution de mouvements corporels du robot tels que lever les bras ou incliner le torse, une fonction de contrôle de stabilisation fonctionne simultanément pour calculer et rectifier le Centre de Masse (CoM) du robot afin de maintenir l'équilibre. Notamment, la structure de concurrence sous-tend les mouvements chorégraphiés tout au long de notre performance, y compris les mouvements de marche du robot. L'intégration de la stabilisation de la marche reste un point focal dans le domaine de la robotique,

spécifiquement pour les robots humanoïdes à haut degré de liberté (DoF[186]), comme nous avons été introduits au concept de stabilisation des robots bipèdes dans la section III.1.1, nous présenterons ensuite notre contrôleur de stabilisation de la marche intégré dans la performance robotique dansée dans la section suivante.

### III.3.1.3 Contrôleur de stabilisation

Issu des travaux révolutionnaires de[187], ce contrôleur de stabilisation a marqué une avancée significative pour l'escalade dynamique des escaliers et la marche, spécifiquement conçu pour un démonstrateur industriel. Cette méthodologie repose sur un contrôleur d'admittance du corps entier, où les stratégies de l'effecteur final et du Centre de Masse (CoM) sont appliquées simultanément. Cela renforce efficacement la stabilité et la performance globale du robot lors des tâches d'escalade. Open-source[188] sous le *framework* mc_rtc, nous avons trouvé une application de ce contrôleur innovant dans le cadre de notre performance artistique. Adapté pour anticiper plusieurs étapes futures du robot, ce contrôleur permet une navigation fluide le long des chemins prédéfinis sur scène, assurant un équilibre continu et réduisant toute instabilité opérationnelle, comme illustré dans la Fig.III.3.3.

### III.3.1.4 Contrôleur de *retargeting* de capture de mouvement

Le dernier contrôleur intégré à notre performance, et également le plus crucial, est le contrôleur de *retargeting* de capture de mouvement. Ce contrôleur permet la synchronisation des mouvements entre l'humain et le robot humanoïde. Les mouvements conçus par la chorégraphe sont souvent complexes, impliquant plusieurs parties du corps simultanément. Il est donc quasi impossible de programmer chaque mouvement uniquement avec le contrôleur de tâches de posture. La complexité de traduire des concepts artistiques abstraits en

186. DoF : Degrees of Freedom.
187. Caron, Stéphane, Kheddar, Abderrahmane, Tempier, Olivier. « Stair climbing stabilization of the HRP-4 humanoid robot using whole-body admittance control ». Dans : *2019 International conference on robotics and automation (ICRA)*. IEEE. 2019, p. 277-283.
188. URL : https://github.com/stephane-caron/lipm_walking_controller

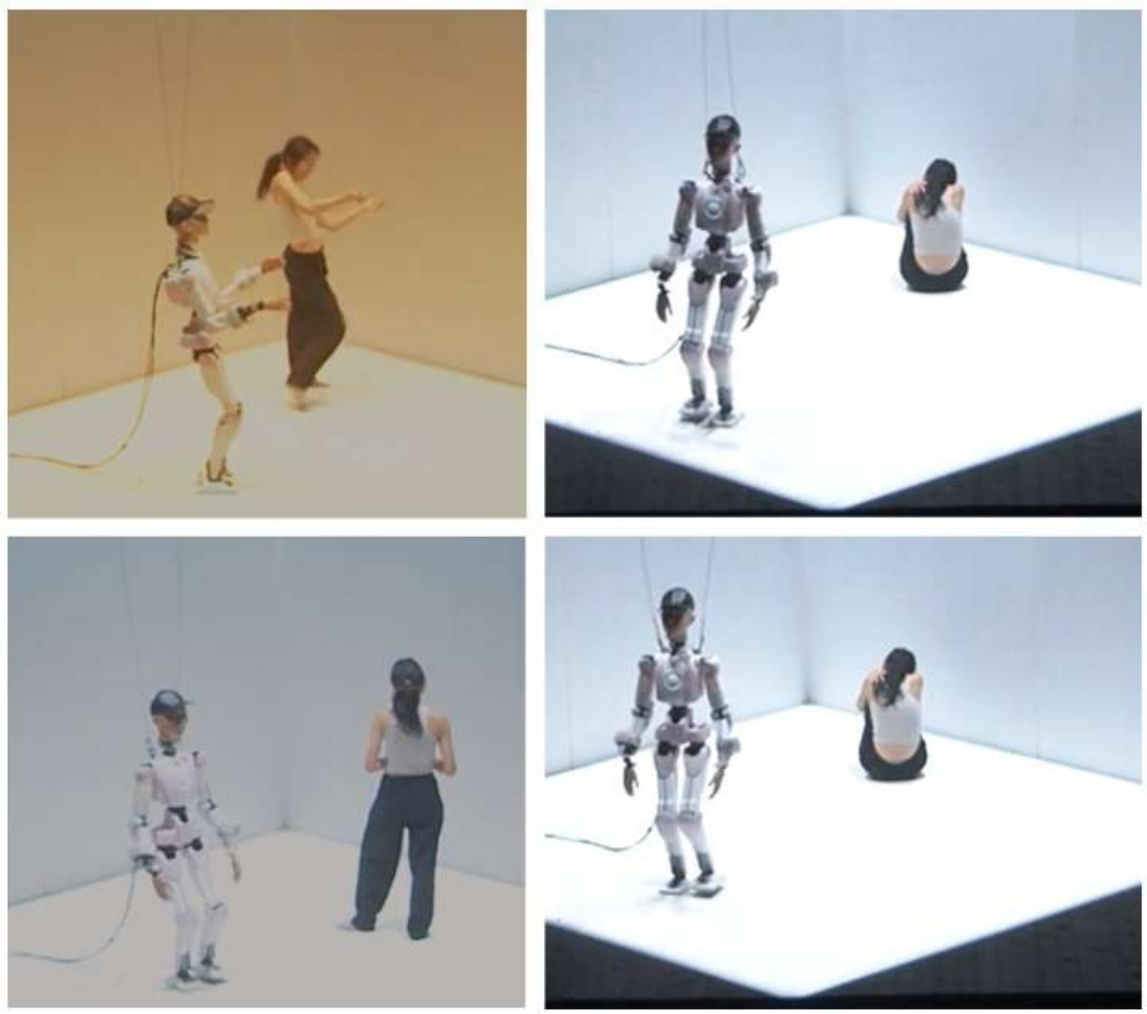


FIGURE III.3.3 – Nous avons appliqué un contrôleur de stabilisation dans notre performance robotique dansée. On peut voir que le robot fait des pas sans tomber.

mouvements robotiques tangibles pose des défis considérables, car l'exécution des modifications de paramètres pour atteindre les postures robotiques envisagées est chronophage. De plus, réaliser des séquences de mouvements complexes, comme des torsions de taille ou des postures de type planche, reste un défi majeur pour le HRP-4, qui a été initialement conçu que pour l'applications industrielles.

Pour surmonter ces obstacles, nous avons adopté une méthode de synchronisation des mouvements humain-humanoïde, inspirée de[189] [190], utilisant une technologie de *low-lag human tracking*[191]. Cette technologie permet de traduire

189. DALLARD, Antonin et al. « Synchronized human-humanoid motion imitation ». Dans : *IEEE Robotics and Automation Letters* 8.7 (2023), p. 4155-4162.
190. LEFÈVRE, Hugo et al. « Humanoid-human sit-to-stand-to-sit assistance ». Dans : *IEEE Robotics and Automation Letters* (2024).
191. URL :https://www.xsens.com/motion-capture

les mouvements de la danseuse en mouvements robotiques correspondants [192] [193]. Les données sont transmises des capteurs de suivi à l'interface de contrôle du robot, puis *retargeting* (avec filtrage dynamique) sur le corps du robot. Ce processus se déroule en deux étapes :

***Première étape : Enregistrement en mode direct et remapping des données***

Nous avons utilisé le système de capture de mouvement Xsens MVN [194] pour enregistrer les expressions corporelles de la danseuse. Grâce à 17 unités de mesure inertielle (IMU) [195], le système permet une estimation précise de la pose et du geste humaine en capturant des données essentielles comme la position, la vitesse et l'accélération. Pour réaliser ce *remapping*, nous avons d'abord effectué une correspondance entre les noms des capteurs de capture de mouvement et les parties du corps correspondantes du robot HRP-4, comme indiqué dans Listing III.3.1. Ensuite, les différences de dimensions corporelles entre la danseuse et le robot ont nécessité des transformations supplémentaires. En utilisant les données de quaternion collectées par les capteurs, nous avons appliqué des transformations sur les données de position pour corriger les décalages avant de les attribuer aux parties du corps du robot. La bibliothèque SpaceVecAlg, mentionnée en III.2.2, a été utilisée pour ces transformations. La deuxième étape suivante serait alors cruciale pour s'assurer que les données transférées peuvent être exécutées sur le robot HRP-4.

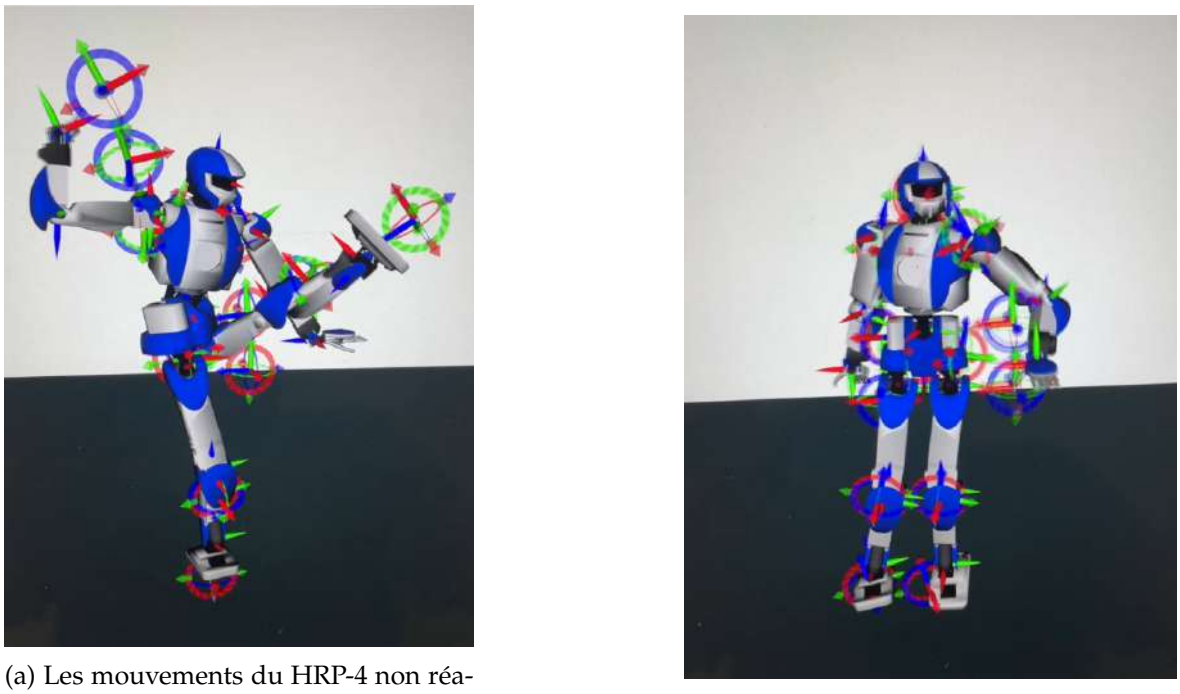
```
Xsens:
  liveMode: false
  hrp4:
    body:
      segment: "Pelvis"
      offset:
```

192. open-source, URL :https://github.com/Hugo-L3174/mc_xsens_plugin
193. open-source, URL :https://github.com/arntanguy/mc_xsens_plugin
194. Roetenberg, Daniel, Luinge, Henk, Slycke, Per et al. « Xsens MVN : Full 6DOF human motion tracking using miniature inertial sensors ». Dans : *Xsens Motion Technologies BV, Tech. Rep* 1.2009 (2009), p. 1-7.
195. Ahmad, Norhafizan et al. « Reviews on various inertial measurement unit (IMU) sensor applications ». Dans : *International Journal of Signal Processing Systems* 1.2 (2013), p. 256-262.

```
7           translation: [0,0,0]
8         # weight: 10
9         # stiffness: 10
10      torso:
11        segment: "T8" # Sternum
12        # weight: 10
13        # stiffness: 10
14      NECK_P_LINK:
15        segment: "Head"
16        offset:
17          translation: [0,0,0]
18          rotation: [0.0, -0.3, 0.0]
19      R_SHOULDER_R_LINK:
20        segment: "Right Shoulder"
21      R_SHOULDER_Y_LINK:
22        segment: "Right Upper Arm"
23        offset:
24          translation: [0,0,0]
25          # rotation: [-1.57, 0, 0] #livemode
26          # rotation: [0, 0, 0] #offlinemode: further adaptation
27      R_ELBOW_P_LINK:
28        segment: "Right Forearm"
29        offset:
30          translation: [0,0,0]
31            #rotation: [-1.57, 0, 0]
32          rotation: [-1.0, 0, 0]
33      r_wrist:
34        segment: "Right Hand"
35        offset:
36          translation: [0,0,0]
37          # rotation: [-1.57, 0, 0]
38          rotation: [-0.3, 0, 0]
39      L_SHOULDER_R_LINK:
40        segment: "Left Shoulder"
41      L_SHOULDER_Y_LINK:
42        segment: "Left Upper Arm"
43        offset:
44          translation: [0,0,0]
45          # rotation: [1.57, 0, 0] #livemode
46          # rotation: [0, 0, 0] #offlinemode: further adaptation
47      L_ELBOW_P_LINK:
48        segment: "Left Forearm"
49        offset:
50          translation: [0,0,0]
51            #rotation: [1.57, 0, 0]
```

```
52          rotation: [1.0, 0, 0]
53      l_wrist:
54        segment: "Left Hand"
55        offset:
56          translation: [0,0,0]
57          # rotation: [1.57, 0, 0]
58          rotation: [0, 0, 0]
59      R_HIP_P_LINK:
60        segment: "Right Upper Leg"
61      R_KNEE_P_LINK:
62        segment: "Right Lower Leg"
63      r_ankle:
64        segment: "Right Foot"
65      L_HIP_P_LINK:
66        segment: "Left Upper Leg"
67      L_KNEE_P_LINK:
68        segment: "Left Lower Leg"
69      l_ankle:
70        segment: "Left Foot"
```

Listing III.3.1 – correspondance entre les noms des capteurs de capture de mouvement et les parties du corps correspondantes du robot HRP-4



(a) Les mouvements du HRP-4 non réalisables.

(b) Les mouvements du HRP-4 réalisables.

FIGURE III.3.4 – Les mouvements du HRP-4 issus de la capture de mouvement.

***Deuxième étape : Relecture en mode hors ligne et filtrage des mouvements***

Après l'enregistrement en mode direct et le *remapping* des données, les données enregistrées dans mc_rtc ont été analysées en mode hors ligne. Un code a été également implémenté avant le processus de la relecture pour éviter l'erreurs de segmentations [196], comme illustré dans Listing III.3.2. Ce processus consiste à relire les données enregistrées pour reconstruire la séquence de mouvements. Cette approche permet de sélectionner systématiquement les mouvements faisable et réalisables par le HRP-4 sur scène. À ce stade, nous n'avions pas établi de méthode systématique pour filtrer les mouvements réalisables, et le processus de recherche dans chaque *log* de relecture était effectué manuellement. Les mouvements non réalisables par rapport aux mouvements réalisables du HRP-4 sont illustrés dans la Fig.III.3.4. Cette étape hors ligne a fourni des informations cruciales sur la qualité et la faisabilité des mouvements enregistrés de la danseuse, incitant ce dernier à modifier et adapter ses gestes dansés pour assurer une synergie harmonieuse avec les capacités du robot humanoïde.

```
# WORKING_DIR = './'
BUFFER_TIME = 1 #(secs)


def first_index_nan(lst: list) -> list:
  for idx, ele in enumerate(lst):
    if(np.isnan(ele)):
      continue
    else:
      return idx

def get_info(bin_f: str) -> str:
  info_bin = subprocess.run(['mc_bin_utils', 'show', bin_f], stdout=subprocess.
    PIPE).stdout.decode('utf-8')
  ts_idx = info_bin.find('End time: ') + len('End time: ')
  te_idx = info_bin.find('Duration: ')
  t = info_bin[ts_idx:te_idx]

```

196. Une erreur de segmentation est une erreur qui se produit lorsqu'un programme tente d'accéder à une zone mémoire non autorisée ou protégée. Cela entraîne une interruption immédiate du programme par le système d'exploitation.

```
18    return np.float64(t[:-2])
19
20  def process(bin_f: str, output_f: str) -> str:
21    print(f"=== start process === \n bin_f = {bin_f}")
22
23    log = mc_log_ui.read_log(bin_f)
24    total_time = get_info(bin_f)
25
26    ref_kname = 'body6d_hrp4_torso_target_qw'
27
28    val = log[ref_kname]
29    transition_idx = first_index_nan(val)
30    print(f"transition_idx = {transition_idx}\n total_idx = {len(val)}\n total_time
        = {total_time}")
31
32    cut_time_s = BUFFER_TIME + math.floor(total_time * (transition_idx/len(val)))
33    cut_time_e = math.floor(total_time)
34    print(f"=== time process done ===\n bin_file = {bin_f}; usable time_s = {
        cut_time_s}; usable time_e = {cut_time_e}")
35
36    print(f"=== running the extraction of bin using mc_bin_utils ===")
37    subprocess.run(['mc_bin_utils', 'extract', bin_f, output_f, '--from', str(
        cut_time_s), '--to', str(cut_time_e)], stdout=subprocess.PIPE)
38
39    print(f"=== process done === \n bin_f = {bin_f}; output name = {output_f}_from_{
        cut_time_s}_to_{cut_time_e}.bin")
40
41  if __name__ == "__main__":
42    parser = ArgumentParser()
43    parser.add_argument("-f", "--file", dest="file_name", help="specify the bin file
         to be processed", metavar="FILE")
44    parser.add_argument("-o", "--output", dest="output_file_name", help="specify the
         output file name of extraced bin")
45    args = parser.parse_args()
46
47    bin_fname = args.file_name
48    output_fname = args.output_file_name #the extraction tool will automatically add
         .bin at the end, so no need to specify the output file name as *.bin
49    process(bin_fname, output_fname)
```

Listing III.3.2 – Preprocessing avant la relecture en mode hors ligne et filtrage des mouvements

Ces deux étapes garantissent donc un *remapping* précis des mouvements

humains sur le corps robotique du HRP-4 et permettent la synchronisation entre les mouvements de la danseuse et ceux du robot, comme illustré dans la Fig.III.3.5. Bien que d'autres méthodes ou dispositifs de capture de mouvement à *low legacy* existent, nous avons choisi cette méthode de synchronisation des mouvements humain-humanoïde pour les intégrer dans notre performance grâce à leur accessibilité et leur stabilité. L'intégration de la technologie de capture de mouvement dans performance artistique n'est pas très rare, mais orchestrer une synchronisation fluide entre un robot humanoïde à haut degré de liberté et les mouvements de la danseuse représente une solution significative pour traduire des concepts artistiques abstraits en mouvements robotiques tangibles dans le processus de création de la performance robotique. Des recherches antérieurs comme [197] [198] [199] ont déjà intégré un système similaire dans la génération de mouvements de leur robot et ont également été appliqués dans des performances dansée préprogrammés. À notre connaissance, c'est la première fois que la synchronisation des mouvements humain-humanoïde est appliquée avec succès sur le modèle de robot HRP-4 dans un contexte de performance dansée artistique. La performance, où le HRP-4 exécute sur scène des mouvements enregistrés par le danseur, favorise donc un dialogue dynamique entre le corps artificiel du robot, les mouvements archivés de la danseuse et les gestes actuels du corps vivant. Nous aborderons plus en détail le concept de dialogue trans-temporel dans la section III.3.3.

Avec tous les outils industriels sélectionnés pour la performance, la question cruciale est de savoir comment les intégrer dans le processus de création artistique. La technologie n'est qu'un médium ; il est essentiel de mettre en avant le concept artistique et de repenser la structure de collaboration entre le directeur artistique,

197. Ramos, Oscar E et al. « Dancing humanoid robots : Systematic use of osid to compute dynamically consistent movements following a motion capture pattern ». Dans : *IEEE Robotics & Automation Magazine* 22.4 (2015), p. 16-26.

198. Nakaoka, Shin'ichiro et al. « Learning from observation paradigm : Leg task models for enabling a biped humanoid robot to imitate human dances ». Dans : *The International Journal of Robotics Research* 26.8 (2007), p. 829-844.

199. Kudoh, Shunsuke et al. « Entertainment robot : Learning from observation paradigm for humanoid robot dancing ». Dans : *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robots Syst. Workshop : Art Robots*. T. 7. 2008.



FIGURE III.3.5 – Remappage des mouvements humains sur le corps robotique.

*creative technologist*, l'ingénieur robotique, la danseuse et la chorégraphe. Cela est d'autant plus important pour une technologie comme la robotique, encore peu courante sur scène dans les spectacles vivant.

## III.3.2 Pipeline complet de la co-création entre ingénier, *creative technologist*, danseuse et metteuse en scène

Le processus complet de co-création de la performance robotique dansée est illustré dans la Fig.III.3.6.

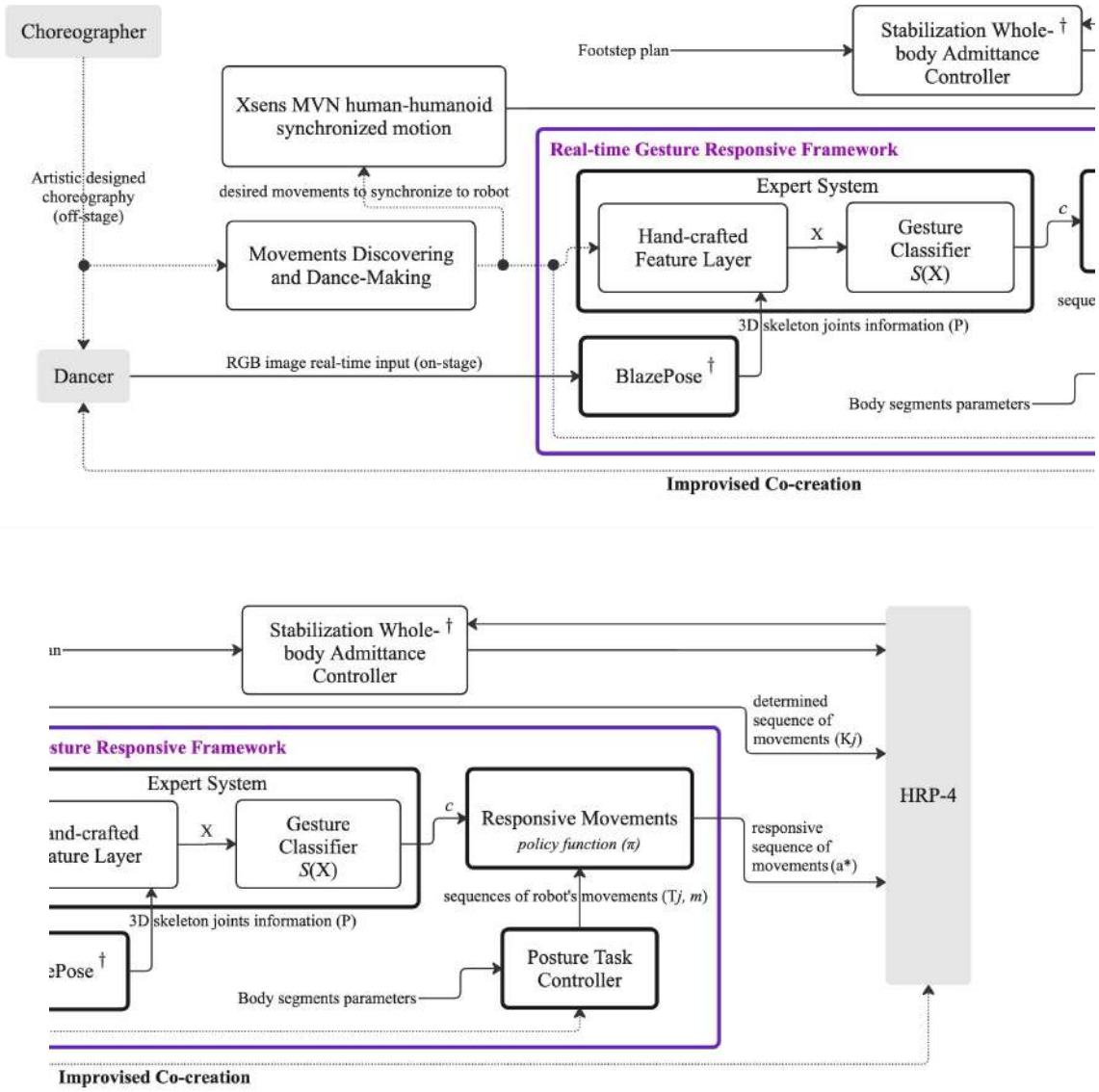



FIGURE III.3.6 – Le processus complet de co-création de la performance robotique dansée. la bordure épaisse représente le cadre proposé : une approche non-portable(*non-wearable*) pour un système interactif basé sur les gestes. Le symbole † en exposant renvoie aux modèles intégrés issus de travaux antérieurs, et la ligne pointillée indique les informations conçues par les artistes.

La chorégraphe et la metteuse en scène commencent par concevoir et répéter de routine des mouvements dansés. Plusieurs séquences de mouvements exploratoires sont testées, pendant lesquelles les mouvements de la danseuse sont capturés à l'aide d'un système de suivi humain à *low latency*. Simultanément, les données brutes des expressions corporelles de la danseuse sont traitées via le système GD-HRIF, conçu et crée par *creative technologist*. Ce système intègre BlazePose pour extraire des informations squelettiques à partir de *RGB camera feed*. Un système expert applique ensuite une couche de caractéristiques conçue à la main et un classificateur pour différencier les mouvements dansé distincts. Ces mouvements dansé reconnus pilotent à leur tour la *policy* de mouvements interactifs pour le robot humanoïde HRP-4, lui permettant de se synchroniser dynamiquement et de co-créer avec la danseuse.

Du côté de l'ingénieur, les mouvements physiques du robot sont stabilisés via un contrôleur d'admittance du corps entier, qui module le placement des pas pour assurer l'équilibre et la fluidité. L'ingénieur robotique supervise la mise en œuvre technique, ajustant finement les algorithmes de contrôle du mouvement et intégrant des boucles de *feedback* entre la danseuse et le robot pour permettre l'interaction. Pendant ce temps, la chorégraphe affine continuellement l'esthétique globale et l'arc narratif de la performance, ajustant de manière itérative à la fois les expressions corporelles de la danseuse et les motifs de mouvement du HRP-4. Ce processus de création itératif favorise une collaboration interactive et cohésive entre l'humain et le robot. Plutôt que de suivre une séquence strictement linéaire, le processus peut être compris comme l'intersection de deux domaines complémentaires : la précision technique et la créativité artistique.

Avant de continuer, Il convient de préciser que je, l'auteure de cette thèse, la danseuse et la *creative technologist* ne constituent pas trois personnes distinctes, mais une seule et même personne, moi. Je choisis cependant de présenter ces identités comme trois rôles séparés, car chacune renvoie à un ensemble de responsabilités et de savoir-faire différents au sein du processus de co-création. Ces rôles restent poreux et s'influent mutuellement. Préciser ainsi la coïncidence de ces fonctions vise

à documenter les biais possibles et à mieux situer les enjeux de cette recherche-création.

### III.3.2.1 Précision technique - travail entre *creative technologist* et ingénieur robotique

Les *creative technologists*, spécialisés dans l'intersection du prototypage artistique et du développement technologique, sont des professionnels dynamiques qui fusionnent les mondes de l'art et de la technologie pour créer des expériences captivantes. Ils conceptualisent et développent des installations interactives, de l'art numérique et des performances multimédias qui captivent le public et repoussent les limites du récit conventionnel. Leur travail implique d'expérimenter avec des technologies émergentes telles que la réalité augmentée, la réalité virtuelle et l'intelligence artificielle pour créer des expériences sensorielles. Les *creative technologists* collaborent avec des musiciens, des danseurs et des artistes visuels pour intégrer la technologie de manière fluide dans les performances en temps réel. De plus, leur travail implique souvent un traitement en temps réel et des environnements réactifs, où l'art évolue avec l'interaction du public. Qu'il s'agisse de concevoir des spectacles de lumière qui réagissent à la musique ou de développer des installations qui répondent au mouvement humain, les *creative technologists* sont à l'avant-garde de la fusion de la technologie avec l'expression artistique.

En tant que *creative technologists*, je joue un rôle crucial en tant que praticien spécialisé dans l'intégration de pratiques artistiques expérimentales avec des méthodes d'ingénierie. En particulier, je me concentre sur les éléments esthétiques émergents au sein des systèmes robotiques fonctionnels, en m'appuyant sur mes expertises en *computer vision*[200], interaction homme-machine et apprentissage automatique.

Afin de réaliser cette performance robotique dansée, j'ai effectué une résidence

200. computer vision, ou vision par ordinateur en fraçais, est un domaine de l'informatique et de l'intelligence artificielle qui permet aux machines de comprendre, analyser et interpréter des images ou des vidéos, de la même manière que le ferait un être humain

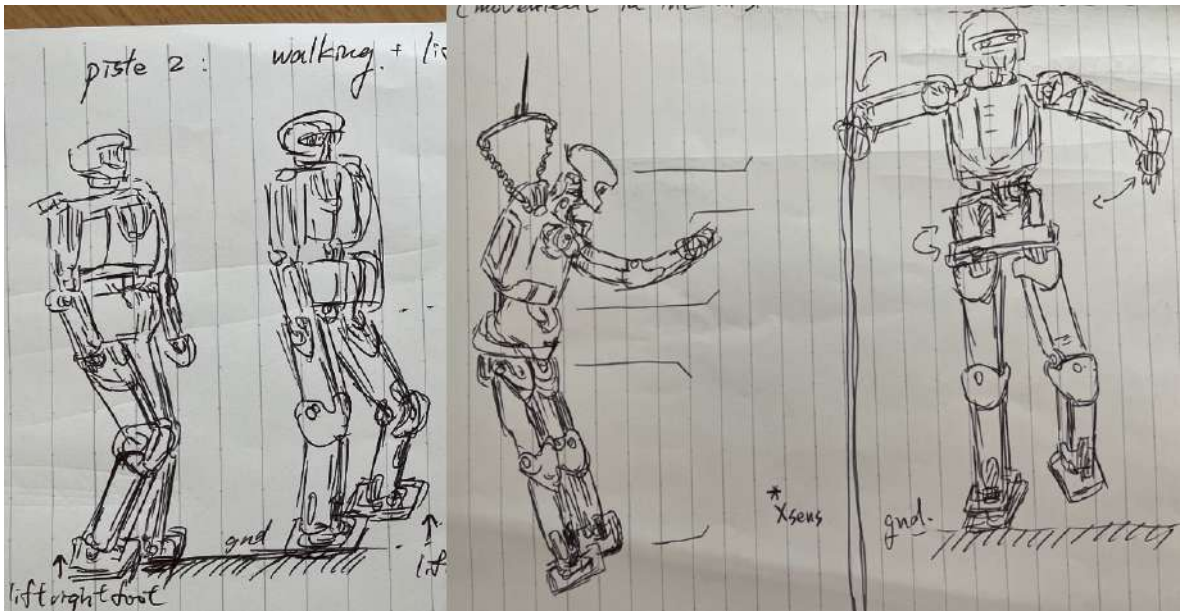



FIGURE III.3.7 – Conceptualisation de différentes movements artistiques pour le HRP-4.

de cinq mois au CNRS-LIRMM[201] en tant que chercheuse invitée. Durant cette période, j'ai collaboré étroitement avec l'ensemble des équipes du projet CECCI-H2M, en articulant mes rôles de danseuse, de *creative technologist* et d'auteure-chercheuse. Nous (moi et toute l'équipe) avons établi une approche systématique du projet en définissant les étapes créatives et techniques nécessaires au développement d'une performance robotique dansée de recherche-création. Le *workflow* a été structuré en deux phases principales : la recherche et développement (R&D) pré-résidence et les expérimentations en résidence. Lors de la phase initiale de R&D, la *creative technologist* a conceptualisé de multiples possibilités artistiques pour le robot, générant divers croquis et visualisations qui exploraient des postures et mouvements non conventionnels. Ceux-ci incluaient des poses dynamiques telles que suspendre le robot en l'air, lever une seule jambe ou un bras, ou incliner la tête à un angle extrême, illustrées dans la Fig.III.3.7. De plus, la première rencontre personnelle entre la *creative technologists* et le HRP-4 au LIRMM nous a encore plus impressionnés par la nature anthropomorphique de cette machine, de taille 158 cm. Comme illustré dans la Fig.III.3.8 la *creative technologists* a instinctivement posé son bras sur l'épaule du robot, à l'instar des interactions sociales humaines, soulignant

201. Comme mentionné précédemment, le CNRS-LIRMM (Laboratoire d'Informatique, de Robotique et de Microélectronique de Montpellier) est partenaire du projet CECCI-H2M, soutenu par l'EUR ArTeC.



FIGURE III.3.8 – La nature anthropomorphique du HRP-4, mesurant 158 cm.

les réponses cognitives et sensori-motrices suscitées par les robots humanoïdes. Cette observation s'aligne avec les théories de l'interaction homme-robot et de la perception sensori-motrice. Les humains attribuent naturellement une signification sociale et émotionnelle aux formes anthropomorphiques en raison de la cognition incarnée et de l'activation des neurones miroirs. Le design humanoïde du HRP-4 évoque une réponse intuitive, où les individus appliquent inconsciemment des modèles d'interaction humaine, malgré la nature mécanique du robot. Cette réalisation a donc souligné le défi de transférer la fluidité humaine aux mouvements robotiques. Certains mouvements exécutés sans effort par les humains, tels que les changements d'équilibre ou l'articulation coordonnée des membres, posent des défis techniques importants pour la mise en œuvre robotique,

tandis que les robots peuvent effectuer des mouvements précis et répétitifs au-delà des capacités humaines. Comme le mentionne le Paradoxe de Moravec « ce qui est facile pour les humains, comme marcher, assurer la locomotion ou coordonner des mouvements fins, est difficile pour les machines, tandis que ce qui nous semble difficile, comme résoudre des équations complexes ou manipuler de lourdes charges, est plus simple pour elles. »[202] [203]

La phase de R&D a débuté par une évaluation des outils industriels existants disponibles au laboratoire, tels que le contrôleur de tâches de posture, le contrôleur de *Finite State Machine*, le contrôleur de stabilisation, le contrôleur de retargeting de capture de mouvement, etc. L'objectif était d'établir un workflow entre le *creative technologist* et l'ingénieur robotique. Un aspect crucial de cette collaboration était le contrôle de version et la gestion logicielle. Nous avons utilisé une plateforme GitLab dédiée, hébergée par le LIRMM (*gitlab :lirmm*), pour centraliser le suivi du code et faciliter le développement collaboratif. Git[204] est un système de contrôle de version distribué qui permet aux développeurs de suivre les modifications des fichiers, de gérer les révisions et de coordonner le travail sur le code entre plusieurs collaborateurs[205]. Chaque développeur maintient une copie locale complète du dépôt[206], et les fonctionnalités de branchement et de fusion[207] de Git soutiennent le

202. Moravec, Hans. *Mind children : The future of robot and human intelligence*. Harvard University Press, 1988.

203. « *Encoded in the large, highly evolved sensory and motor portions of the human brain is a billion years of experience about the nature of the world and how to survive in it. The deliberate process we call reasoning is, I believe, the thinnest veneer of human thought, effective only because it is supported by this much older and much powerful, though usually unconscious, sensor motor knowledge. We are all prodigious Olympians in perceptual and motor areas, so good that we make the difficult look easy. Abstract thought, though, is a new trick, perhaps less than 100 thousand years old. We have not yet mastered it. It is not all that intrinsically difficult ; it just seems so when we do it.* »— Hans Moravec. « *Mind Children : The Future of Robot and Human Intelligence* ». p.15-16 (1988)

204. Git a été créé par Linus Torvalds en 2005 pour gérer le développement du noyau Linux. Il a été conçu comme un système de contrôle de version distribué (DVCS) pour être rapide, évolutif et efficace.

205. Chacon, Scott, Straub, Ben. *Pro git*. Springer Nature, 2014.

206. Un dépôt (ou repo) dans Git est un espace de stockage où sont conservés tous les fichiers et l'historique d'un projet. Il sert d'espace de travail numérique qui suit chaque modification apportée aux fichiers, permettant à plusieurs personnes de collaborer efficacement sans perdre les versions antérieures. C'est comme un dossier Google Drive pour les développeurs, avec des fonctionnalités avancées telles que le contrôle de version, la fusion et la révision des modifications.

207. Le branchement et la fusion dans Git permettent à plusieurs développeurs de travailler simultanément sur différentes fonctionnalités ou corrections sans interférer avec le projet principal. Une branche est comme un espace de travail séparé où des modifications peuvent être apportées indépendamment de la base de code principale (souvent appelée branche principale ou maître). Les

développement parallèle et l'intégration de fonctionnalités expérimentales sans compromettre la stabilité du projet principal. Git permet ainsi à plusieurs contributeurs de travailler simultanément tout en maintenant un historique de développement cohérent, comme illustré dans la Fig.III.3.9.

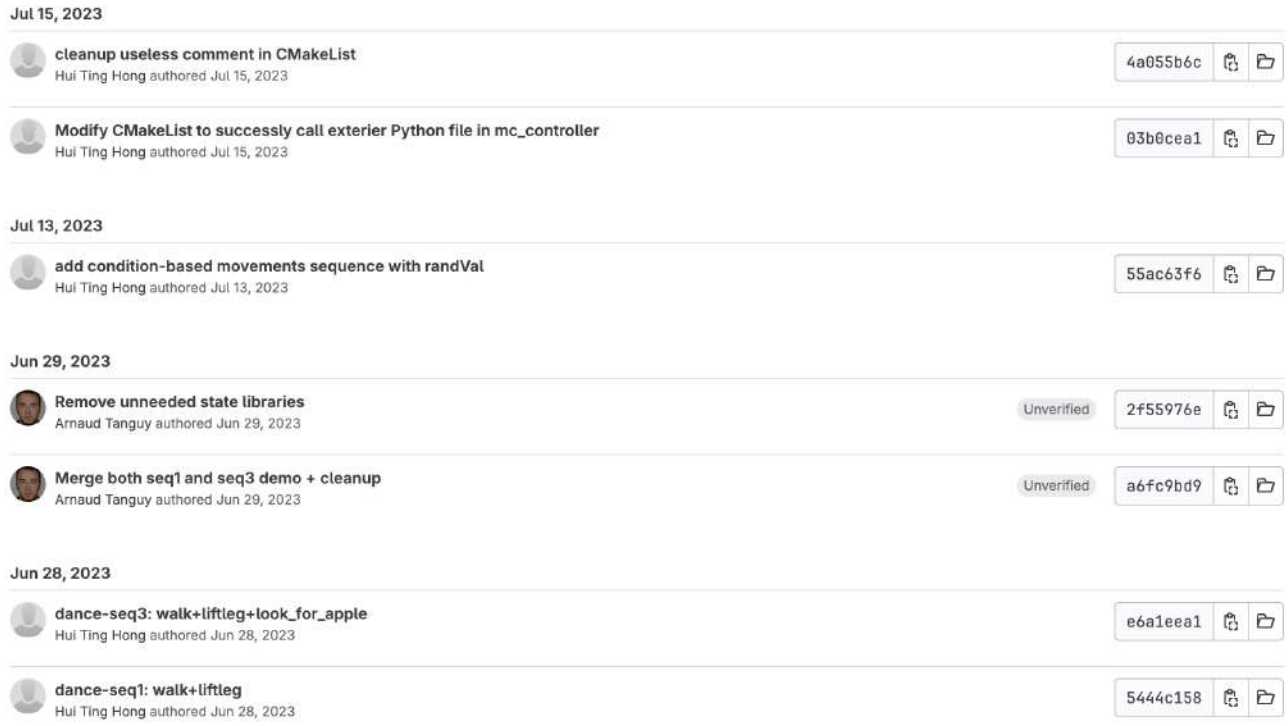
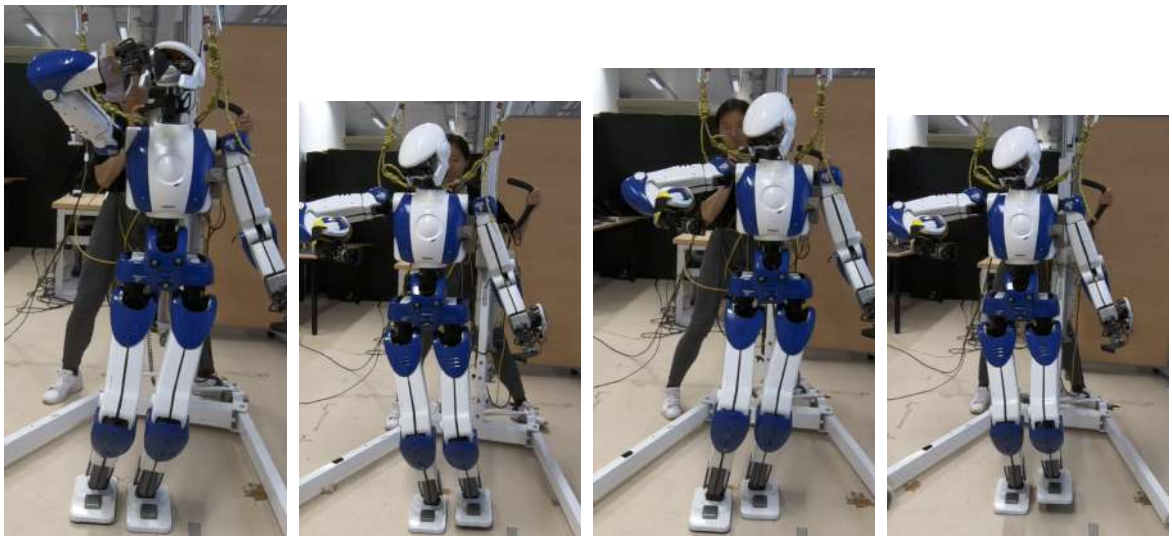



FIGURE III.3.9 – *Git* permet à plusieurs contributeurs de travailler simultanément.

D'autre part, GitHub et GitLab sont des plateformes basées sur le web qui s'appuient sur les capacités de Git en fournissant des fonctionnalités supplémentaires telles que le suivi des problèmes, la gestion de projet et les outils d'intégration continue. GitHub est largement utilisé dans la communauté open-source pour son interface conviviale et ses nombreuses fonctionnalités de codage social, tandis que GitLab offre des fonctionnalités similaires et permet aux institutions d'héberger leurs propres serveurs, offrant ainsi un plus grand contrôle sur les données et la personnalisation. Dans ce projet, le serveur GitLab dédié du LIRMM a servi de centre *hub* pour l'édition de code, le contrôle de version et le développement collaboratif, garantissant que le *creative technologist* et l'ingénieur robotique restent synchronisés et assurent un processus rationalisé sur le même

développeurs créent des branches pour expérimenter, développer de nouvelles fonctionnalités ou corriger des bugs. Une fois le travail terminé et testé, la branche peut être fusionnée dans le projet principal, intégrant ainsi les modifications.



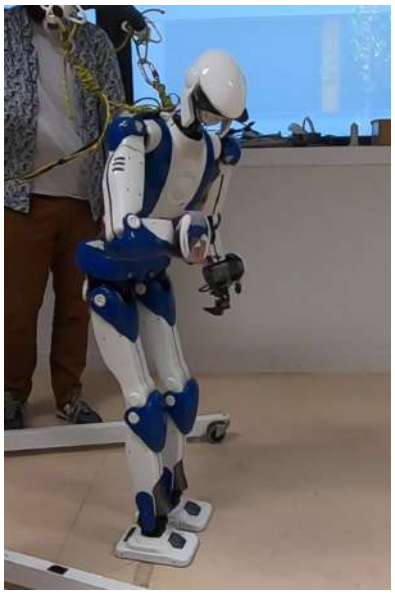
(a) (b) (c) (d)

FIGURE III.3.10 – Une séquence de mouvements du HRP-4 avec l'intégration du stabilisateur LIPM, où nous pouvons voir ses jambes alterner de gauche à droite pendant l'exécution des mouvements.

dépôt pour le développement itératif, le débogage et l'intégration des algorithmes de mouvement artistique dans le système et *framework* robotique.

Pendant la période pré-résidence au CNRS-LIRMM, le *creative technologist* a mené des expérimentations approfondies pour explorer et affiner l'intégration de différents contrôleurs, cherchant à refléter notre première imagination des mouvements ou gestes non conventionnels des robots. Ces tests préliminaires ont servi de base pour comprendre la fluidité, la réactivité et le potentiel expressif du HRP-4. L'une des premières expériences a consisté à concevoir une séquence de mouvements qui imitait les mouvements de regarder en haut et en bas, comme si le robot cherchait des champignons dans son environnement, comme illustré dans la Fig.III.3.11. Cette exploration a conduit à des reglementations supplémentaires, où la séquence de mouvements a été combinée avec des paramètres supplémentaires tels que des variations de timing et des transitions fluides pour améliorer l'illusion d'un comportement intentionnel. Une autre itération de ce concept a impliqué de mélanger le mouvement de « recherche de champignons » avec une version plus lente du stabilisateur LIPM, également illustrée dans la Fig.III.3.10.

Au-delà de ces séquences de mouvements, des tests complets ont été menés pour évaluer les capacités et la scalabilité des contrôleurs de retargeting de capture de



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

FIGURE III.3.11 – une séquence de mouvements de HRP-4 qui imitait les mouvements de regarder en haut et en bas

mouvement. Ces expériences impliquaient la capture de mouvements humains et leur transfert sur le robot humanoïde en temps réel, assurant que le transfert de données et les mouvements générés restent stables. Plusieurs séquences de test ont été conçues pour examiner l'intégration des mouvements générés par la capture de mouvement avec le contrôleur de stabilisation, comme montré dans la FigIII.3.12.

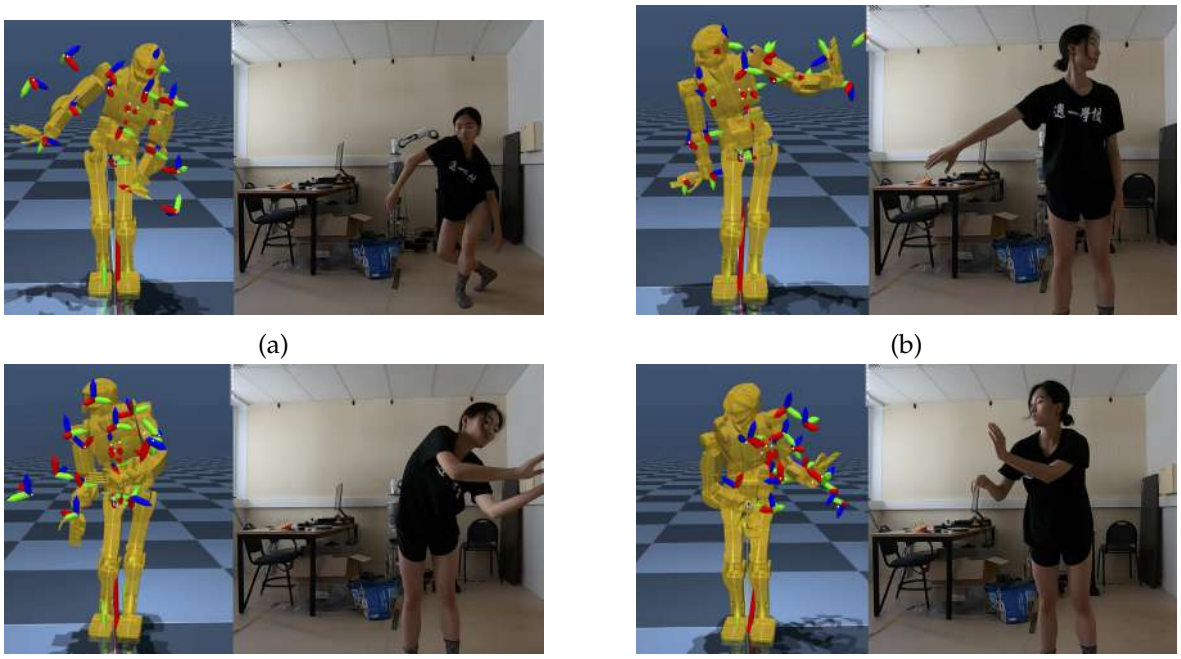


(a) (b) (c)

FIGURE III.3.12 – mouvements du HRP-4 générés par Xsens-MVN.

Un autre aspect central de l'expérimentation s'est concentré sur la chorégraphie du mouvement robotique dans un environnement virtuel pour faciliter la création des séquences de danse en duo. Les résultats des tests, illustrés dans la FigIII.3.13, ont démontré le potentiel d'intégration de la robotique dans des performances chorégraphiées de manière à synthétiser les gestes naturels du corps vivant de la danseuse avec plusieurs couches de données de mouvements du robot. De plus, le système GD-HRIF a été développé et structuré comme un contrôleur personnalisé, aligné avec d'autres contrôleurs standard de l'industrie couramment utilisés dans les applications robotiques, en attente d'être intégrés ensemble en fonction des besoins de notre performance robotique dansée.

La deuxième phase d'expérimentation en résidence commence par notre résidence de 3 semaines au Centre d'Art d'Enghien-les-Bains, où les principaux efforts ont été consacrés à l'intégration du GD-HRIF développé avec les outils industriels en utilisant le *Finite State Machine (FSM)* sous le open-source mc_rtc. Il y a eu certaines évolutions de notre structure FSM basées sur le changement de



(a) (b)

(c) (d)

FIGURE III.3.13 – une séquences de danse en duo entre la danseuse et HRP-4.

dramaturgie décidé par la metteuse en scène pendant la résidence, et à mesure que la structure de la performance se stabilisait, la Fig.III.3.14 montre le diagramme résultant de notre performance robotique dansée[208]. Comme nous l'avons mentionné, le développement et la construction de contrôleurs intégrés, y compris le GD-HRIF et d'autres outils industriels, dépendent principalement du schéma dramaturgique. En d'autres termes, nous ne pourrions pas réaliser le développement technique sur scène sans la construction préalable de l'idée artistique et de son histoire concrète, ce qui nous amène à la deuxième section du processus de co-création montrée précédemment dans la Fig.III.3.6 : le côté artistique.

208. À la suite de *Walk : :ForwardAndLeft*, on peut observer que l'interaction dansée (GD-HRIF) est définie sur *Fake*. Comme nous l'expliquerons dans la section suivante III.3.3, après avoir terminé toutes les répétitions, nous avons décidé d'ajouter un masque en silicone sur la tête du robot afin de rendre la performance plus réaliste et plus engageante pour le public. Cependant, ce masque n'était pas totalement stable et obstruait parfois la caméra, empêchant ainsi le bon fonctionnement du GD-HRIF. Nous avons donc désactivé le mode GD-HRIF (d'où l'indication *Dance : :Interaction : :Fake*) lors de la présentation finale sur scène afin de garantir le bon déroulement de la performance.

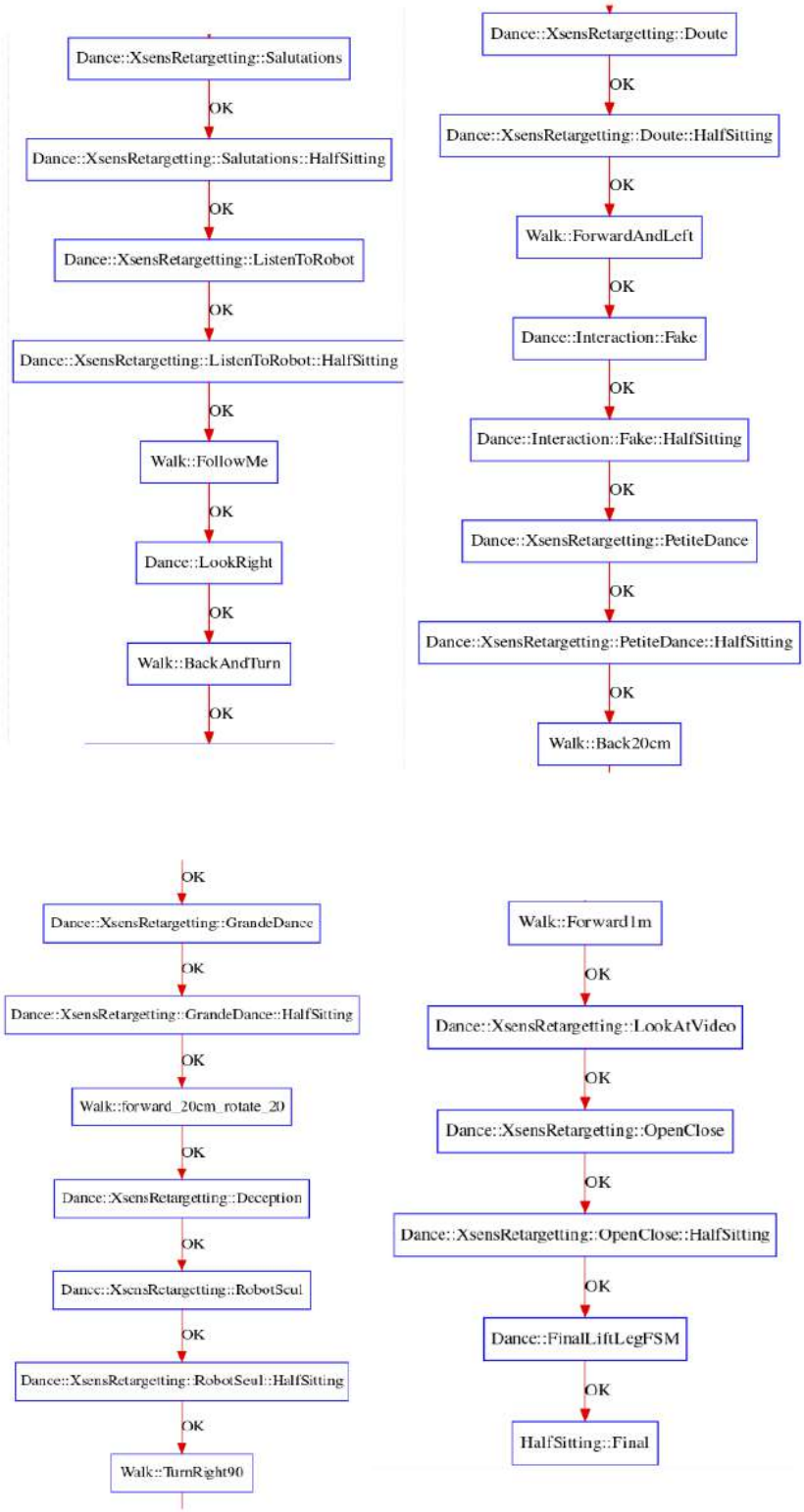



FIGURE III.3.14 – Diagramme complet de *FSM* de notre performance robotique dansée. Diagramme généré © Arnaud Tanguy.

### III.3.2.2 Création d'un contexte pour l'incarnation du développement technologie – une dramaturgie

Dans le cadre d'un spectacle vivant, la dramaturgie joue un rôle crucial en façonnant à la fois le déroulement narratif et l'expérience esthétique. Elle engage le public et inspire la pratique créative. Selon Schechner[209], une performance bien structuré invite le public à vivre une expérience immersive où les frontières entre émotion humaine et innovation technologique deviennent intentionnellement ambiguës.

Simultanément, la dramaturgie offre aux créateurs un plan dynamique pour la prise de décision, influençant les choix relatifs au timing, à l'interaction et à l'intégration des systèmes autonomes, une idée développée par Dixon[210] dans son analyse de la performance numérique. Dans cette double fonction, la dramaturgie ne se contente pas d'organiser la progression des événements, mais elle crée également un espace réflexif où l'artiste et le spectateur/publique sont constamment redéfinis à travers leur interaction avec les technologies émergentes[211]. Au sein de notre équipe artistique, nous avons réfléchi aux questions suivantes :

— Quels sont les mécanismes centraux qui sous-tendent l'interaction entre la danseuse et les entités artificielles dans les conversations autonomes ?

— Comment les systèmes interactifs autonomes établissent-ils un pont dynamique pour faciliter la co-création improvisée entre le robot humanoïde et la danseuse ?

Pour explorer ces questions, nous avons imaginé une dramaturgie avec une narration fictive :

> Dans le déroulement du récit, la protagoniste incarne une âme recluse, enfermée dans les limites de son appartement, aux prises avec une

209. Schechner, Richard. *Performance theory*. Routledge, 2003.
210. Dixon, Steve. *Digital performance : a history of new media in theater, dance, performance art, and installation*. MIT press, 2015.
211. Auslander, Philip. *Liveness : Performance in a mediatized culture*. Routledge, 2022.

cacophonie d'émotions oscillant entre la peur, la haine, la joie, et des accès d'extase inexplicable mêlés à une profonde mélancolie. Ces tourments intérieurs sont exacerbés par la menace latente d'entités organiques tapies au-dehors, leur présence oppressante distillant en elle une angoisse sourde. Dans ce tumulte émotionnel, une échappatoire inattendue se dessine sous la forme d'un robot humanoïde, réplique parfaite de sa propre silhouette, qui devient peu à peu un compagnon providentiel. Un jeu délicat s'instaure entre eux : elle lui enseigne des gestes, partage avec lui des instants d'intimité, et lui confie, au fil de longues conversations, les échos de son isolement. Tantôt mécanique et distant, tantôt imprégné d'une chaleur troublante, le robot laisse poindre, par intermittence, des éclats d'autonomie qui la surprennent et l'intriguent. Si la communication entre eux est d'abord laborieuse, le robot, en puisant dans sa mémoire façonnée par leurs échanges, finit par saisir les nuances de ses intentions. Ce tissage progressif de souvenirs communs érige un pont fragile entre la machine et l'humaine, insufflant à cette relation singulière une illusion de réconfort. À mesure que les jours s'égrènent, la vulnérabilité de la jeune femme se transforme, portée par cette connexion naissante. Mais au-delà des murs de son refuge, le monde extérieur poursuit sa lente mutation. La présence des entités organiques, jadis synonyme de crainte et de chaos, se métamorphose en un catalyseur inattendu. Ce basculement d'émotions la pousse à reconsidérer non seulement son lien avec le robot, mais aussi à esquisser une nouvelle relation avec la vie artificielle elle-même, dans un équilibre fragile entre appréhension et fascination.

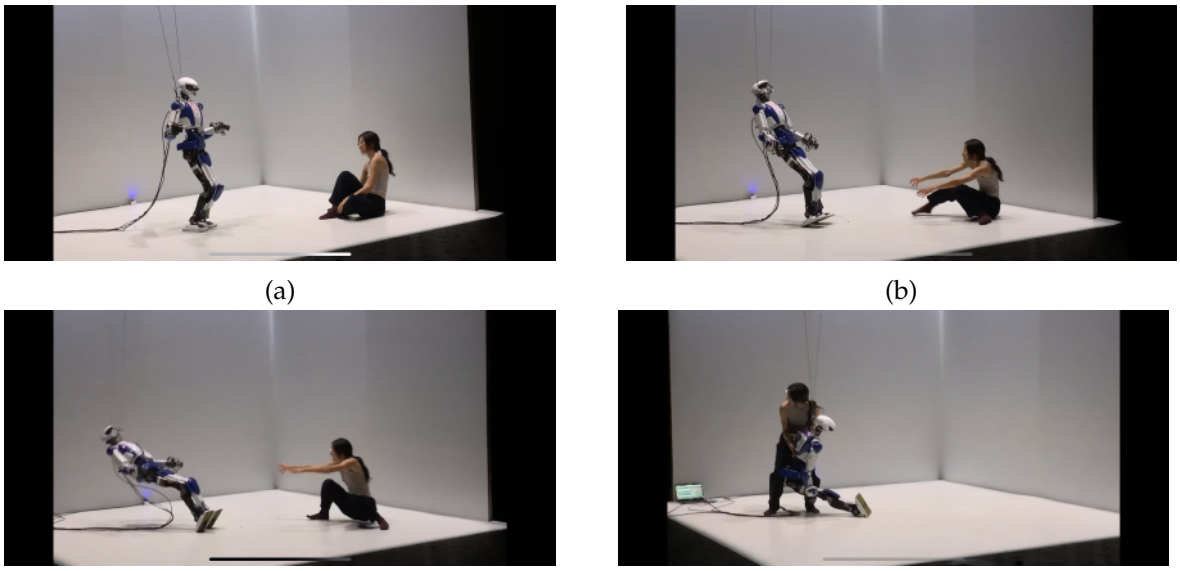
Avec la complémentarité entre l'artistique et l'ingénierie, la performance robotique dansée a été construite. L'ensemble de la performance peut être visualisé ici : www.youtube.com/watch?v=iAVdj0rey5M.

## III.3.3 Une performance robotique dansée

Dans le cadre de notre recherche-création, cette performance robotique dansée de 10 minutes a été présentée à l'auditorium du Centre des Art d'Enghien-les-Bains lors de l'ouverture saison 2023-2024. Contrairement à l'environnement de simulation adaptable et observable, la performance sur scène a rencontré plusieurs défis critiques liés à la transition entre la simulation et l'exécution en temps réel. Parmi ces défis, des problèmes de fragilité avec le robot se sont manifestés : des dysfonctionnements mécaniques du moteur ont entraîné des chutes occasionnelles lors des répétitions de stabilisation de la marche (comme illustré dans la Fig.III.3.15, où le robot est tombé si sévèrement qu'il a failli toucher le sol, heureusement retenu par le câble de sécurité). De plus, le temps de fonctionnement prolongé de robot humanoïde nécessaire pour les répétitions d'un spectacle vivant, généralement de 40 à 60 minutes (10 minutes pour la performance principale, plus au moins 30 à 50 minutes pour la calibration et les ajustements avant et après), a posé des défis inédits. En effet, une activité motrice soutenue n'est pas courante dans les scénarios de test robotiques scientifiques standard. Un autre défi réside dans la nature dynamique et imprévisible des interactions entre la danseuse et le robot, nécessitant des adaptations continues sur scène, contrairement à l'environnement contrôlé et prévisible du laboratoire.

Malgré ces défis, la narration fictive présentée dans la section précédente a démontré les bases fondamentales de notre exploration de la temporalité et du processus de co-création dans le contexte de la mise en scène des interactions. La co-création entre la danseuse et les robots (ainsi que leurs systèmes) favorise un dialogue sur scène qui transcende les dimensions temporelles, soulignant la fusion potentiellement harmonieuse des entités autonomes et des êtres humains. Les actions trans-temporelles se manifestent dans diverses dimensions :

— Du présent au futur : le script de la performance tisse une narration fictive qui orchestre un voyage temporel au sein de l'auditorium, transportant le public de 2023 au futur 2035. En même temps, sa narration est entrelacée avec



(a) (b)

(c) (d)

FIGURE III.3.15 – Le HRP-4 tombe en arrière au milieu de la répétition

la représentation de l'Écosystème Virtuel Évolutif (E.V.E.), qui sert de toile dynamique pour spéculer sur les défis et les réponses aux menaces biologiques potentielles dans notre futur imaginé.

— Du passé au présent : les mouvements du robot, partiellement générés à partir des mouvements enregistrés de la danseuse lors d'instances précédentes par la technologie de capture de mouvement, qui seront détaillés dans la section Méthodologie. Ce processus engendre un jeu dynamique entre le corps artificiel du robot, les mouvements archivés de la danseuse et les gestes actuels de la danseuse.

— Dans le moment présent : le *Gesture Dancing Humanoid Robot Interactive Framework* (GD-HRIF) permet au robot de répondre de manière autonome aux gestes de la danseuse en temps réel, favorisant une interaction dynamique homme-machine qui se déroule dans le moment présent sur scène.

Les actions trans-temporelles complètes réalisées dans cette recherche sont présentées dans la Fig.III.3.16. Nous pouvons observer que cette performance dansée a été révélée avec une dramaturgie, et d'un point de vue technique, ancrée dans des principes chorégraphiques, le système de classification des gestes du cadre GD-HRIF définit les gestes d'expression artistique, offrant ainsi un cadre

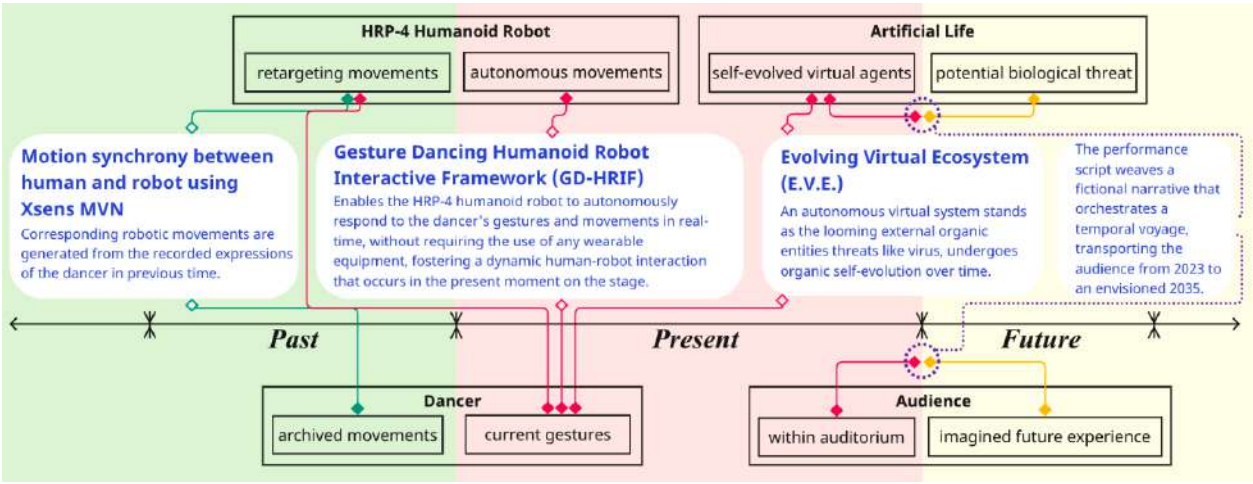



FIGURE III.3.16 – Démontre un dialogue de co-création entre un robot humanoïde HRP-4, une danseuse et un système de vie artificielle, favorisant un dialogue interdisciplinaire évolutif.

structuré mais polyvalent pour interpréter les mouvements de la danseuse. Cela permet à la danseuse de créer une variété d'expressions tout en maintenant la cohérence au sein des classes de gestes prédéterminées. De plus, l'intégration d'une *policy function* dans le contrôle des mouvements interactifs du robot permet une participation active du robot dans la narration de la performance. Le robot peut ainsi sélectionner dynamiquement les actions optimales en réponse aux gestes de la danseuse. En tenant compte de l'information séquentielle des mouvements de la danseuse, les réponses du robot deviennent imprévisibles, enrichissant l'interaction de spontanéité et de fluidité.

Ce cadre fonctionne également en concurrence avec un contrôleur de stabilisation, mentionné dans la section III.1.1, et en tandem avec l'abonné ROS. Cette configuration à double état permet au composant contrôleur du robot d'exécuter les gestes réactifs en temps réel, basés sur le résultat de la classification des gestes de la danseuse, tout en exhibant une latence minimale et en préservant l'équilibre debout du robot lors de l'interaction avec la danseuse. Malgré une latence moyenne de 0,4 seconde entre les composants visuels et les composants contrôleurs spécialisés du robot, l'imperceptibilité du délai pendant les performances peut être attribuée aux distractions introduites par d'autres éléments médiatiques tels que l'éclairage, la musique et la scénographie.

Sur scène, nous avons conçu une scène de performance caractérisée par quatre



FIGURE III.3.17 – Une scène de quatre murs blancs conçue par une metteuse en scène.

panneaux blancs positionnés verticalement au centre, dans un espace scénique de 250 $m^2$ , illustré dans la Fig.III.3.17. Ces panneaux, mesurant respectivement 3 m × 1,5 m et 3,5 m × 1,5 m, ont été stratégiquement incorporés pour transmettre une narration décrivant la première rencontre d'une fille avec un robot humanoïde. La performance mettait en scène une seule danseuse et un robot humanoïde HRP-4, avec un éclairage soigneusement arrangé pour compléter chaque interaction entre eux. Un total de 104 heures a été consacré à des répétitions méticuleuses sur scène, intégrant la danseuse, le robot, l'éclairage, la musique et la scénographie, basé sur le pipeline de collaboration mentionné en III.3.2. Pour assurer la sécurité, le HRP-4 a été sécurisé avec deux câbles en acier de 8 mm de diamètre attachés au plafond de la scène tout au long de l'expérimentation. Notre système interactif en temps réel aux gestes et aux movements, GD-HRIF, a été réalisé par une caméra ZED 2 installée sur le HRP-4, avec une sortie vidéo configurée en mode 720$p$ et une résolution de 2560×720.

Étant donné que cette performance met en scène une danseuse et un robot humanoïde HRP-4, nous allons analyser chaque étape de la performance en nous

concentrant sur les actions de la danseuse. La performance se divise en quatre phases principales : i) peur et vulnérabilité, ii) surprise et curiosité, iii) intégration et interaction, iv) catharsis émotionnelle et revitalisation.

En s'appuyant sur l'approche artistique de création gestuelle de la danseuse, décrite dans la Partie II, celle-ci met l'accent sur la formation des acteurs de théâtre : chaque mouvement et chaque geste doivent avoir une intention claire pour que le public adhère à l'histoire racontée. Nous nous sommes concentrés sur la narration dramaturgique et avons réimaginé chaque scène à travers les expressions corporelles de la danseuse, communiquant des émotions et des éléments dramatiques par des mouvements et des gestes précis[212]. Sa danse se déploie en quatre étapes distinctes, chacune contribuant à la narration de son interaction avec les entités artificielles en évolution : le robot et l'E.V.E.

### III.3.3.1 La premier phase : peur et vulnérabilité

Dans la première étape, celle de la peur et de la vulnérabilité, comme décrit dans la dramaturgie :

> Dans le déroulement du récit, la protagoniste incarne une âme recluse, enfermée dans les limites de son appartement, aux prises avec une cacophonie d'émotions oscillant entre la peur, la haine, la joie, et des accès d'extase inexplicable mêlés à une profonde mélancolie. Ces tourments intérieurs sont exacerbés par la menace latente d'entités organiques tapies au-dehors, leur présence oppressante distillant en elle une angoisse sourde. [. . . ]

Ses mouvements traduisent une peur palpable et une vulnérabilité, incarnant le tumulte intérieur provoqué par la menace extérieure des entités organiques créées par l'E.V.E. Cette représentation se caractérise par des gestes tendus et crispés, ainsi qu'une posture physique visiblement recroquevillée, évoquant efficacement un

212. chaque geste sur scène doit avoir un but, incarnant un principe fondamental du spectacle vivant. Chaque mouvement porte un sens, enrichit la narration et garantit la cohérence. Cette rigueur assure des actions intentionnelles, renforçant le récit et captivant le public avec clarté et précision.



(a) (b)



(c) (d)

FIGURE III.3.18 – Quatre étapes distinctes ont contribué à la narration de l'interaction trans-temporelle avec les entités artificielles en évolution : le robot humanoïde HRP-4.

sentiment de danger imminent et de trouble émotionnel, comme le montre la Fig.III.3.18a. La rencontre suivante avec le robot humanoïde HRP-4 est, comme illustré dans la dramaturgie :

« [. . . ] Dans ce tumulte émotionnel, une échappatoire inattendue se dessine sous la forme d'un robot humanoïde, réplique parfaite de sa propre silhouette, qui devient peu à peu un compagnon providentiel. Un jeu délicat s'instaure entre eux [. . . ] »

### III.3.3.2 La deuxième phase : surprise et curiosité

Ce qui nous conduit à la deuxième étape, marquée par la surprise et une curiosité prudente, visible dans les mouvements et gestes de la danseuse qui évoluent de petits et repliés à plus amples. À mesure qu'elle s'habitue au robot, ses tentatives d'interaction et de communication se font plus douces, révélant un contraste poignant entre la délicatesse de l'expression humaine et la précision mécanique du robot, comme illustré dans la Fig.III.3.18b.

Ainsi, une relation subtile se tisse entre la danseuse et le HRP-4, née de cette volonté d'établir une connexion et d'interagir avec le robot.

> [. . . ]elle lui enseigne des gestes, partage avec lui des instants d'intimité, et lui confie, au fil de longues conversations, les échos de son isolement. Tantôt mécanique et distant, tantôt imprégné d'une chaleur troublante, le robot laisse poindre, par intermittence, des éclats d'autonomie qui la surprennent et l'intriguent [. . . ]

### III.3.3.3 La troisième phase : intégration et interaction

Nous passons à la troisième étape de l'intégration du système GD-HRIF, marquée par une interaction dynamique entre la danseuse et les capacités autonomes du robot. Elle vit un échange fluide d'énergie, parfois guidée par les réponses préprogrammées du robot, et d'autres fois par des réactions autonomes imprévues. Cette étape renforce le sentiment d'improvisation et de liberté créative

pour la danseuse, comme illustré dans la Fig.III.3.18c, où elle danse et célèbre avec le robot.

### III.3.3.4 La quatrième phase : catharsis émotionnelle et revitalisation

Après toute cette joie et ces célébrations, la phase finale, celle de la catharsis émotionnelle et de la revitalisation, met en lumière la convergence des souvenirs partagés entre la danseuse, le robot et l'écosystème virtuel, résonnant dans la toute dernière partie de notre dramaturgie.

> [. . . ] Si la communication entre eux est d'abord laborieuse, le robot, en puisant dans sa mémoire façonnée par leurs échanges, finit par saisir les nuances de ses intentions. Ce tissage progressif de souvenirs communs érige un pont fragile entre la machine et l'humaine, insufflant à cette relation singulière une illusion de réconfort. À mesure que les jours s'égrènent, la vulnérabilité de la jeune femme se transforme, portée par cette connexion naissante. Mais au-delà des murs de son refuge, le monde extérieur poursuit sa lente mutation. La présence des entités organiques, jadis synonyme de crainte et de chaos, se métamorphose en un catalyseur inattendu. Ce basculement d'émotions la pousse à reconsidérer non seulement son lien avec le robot, mais aussi à esquisser une nouvelle relation avec la vie artificielle elle-même, dans un équilibre fragile entre appréhension et fascination.

Symbolisant un moment collectif de souvenirs émotionnels, les mouvements de la danseuse expriment une détermination renouvelée et une résurgence émotionnelle. Elle tend à nouveau la main pour tenter de relancer la conversation avec le robot, comme illustré dans la Fig.III.3.18d.

Malgré la narration prédéfinie de la performance, la danseuse a improvisé dans chaque section pour explorer les interactions avec les entités artificielles. Une prise

de conscience progressive a émergé : la clé de l'interaction entre la danseuse et le robot humanoïde réside dans la poursuite continue d'un rythme partagé et dans les ajustements constants des expressions, des rôles et des réponses. L'adaptation mutuelle et la co-création en temps réel sont restées essentielles, et l'interaction entre les entités humaines et artificielles repose sur la capacité à improviser et à co-créer en temps réel.

Après la performance, les retours du public ont offert une perspective extérieure sur notre recherche-création. Les spectateurs ont décrit un profond sentiment de silence partagé qui transcendait les limites de l'auditorium. Ils ont également noté une connexion synchrone avec l'essence rythmique de la performance, allant jusqu'à décrire une synchronisation partagée de la respiration. Cette expérience collective a mis en lumière le moment spécifique d'enaction transformé par le dialogue trans-temporel entre l'humain et le robot. Comme discuté dans Clement et al.[213] et Chen et al.[214], être en action est une redéfinition en boucle de ce que notre corps vit pleinement et expérimente avec l'environnement. Dans ce contexte, notre perception n'est ni statique ni passive, mais activement façonnée par nos actions en cours, la perception étant ainsi guidée par l'action, comme mentionné en I.1.1. Alors que le public regardait la performance, caractérisée par la poursuite d'un rythme partagé à travers l'adaptation mutuelle et la co-création improvisée, les conversations trans-temporelles ont transformé l'environnement de l'auditorium et créé un nouveau moment partagé, proche du gel, enaction temps. C'est un moment temporellement étendu où les frontières entre soi et l'environnement s'estompent, et le public s'immerge dans une expérience partagée et co-créée. Cela suggère que la performance constituait plus qu'un simple événement d'observation. Au lieu de cela, elle a servi de catalyseur pour une expérience transformative, incluant le flux rythmique, la dynamique spatiale, les composants interactifs et les gestes de la danseuse. Ce phénomène a enrichi les conversations temporelles et le jeu dynamique entre les entités humaines et artificielles, insufflant la vie à la

213. Clément, Fabrice. « Quel savoir pour l'éthique ? Action, sagesse et cognition (Francisco Varela) ». Dans : *Réseaux. Communication-Technologie-Société* 15.84 (1997), p. 171-173.

214. Chen, Chu-Yin. « Un monde pleinement énacté ». Dans : *Action, énaction : l'émergence de l'œuvre d'art* (2017), p. 53-76.

co-création improvisée et à la narration de la performance sur scène, transformant finalement l'expérience d'observation du public en une expérience participative.

# Chapitre III.4

# Vers la co-création avec l'IA : génération de mouvements

## Introduction

L'intégration de l'intelligence artificielle (IA) et de la robotique a considérablement fait évoluer la capacité des robots à interagir avec les humains de manière naturelle et engageante. La conception de robots centrés sur l'humain et sur l'interaction vise à créer des machines capables de percevoir, d'interpréter et de répondre aux actions humaines de façon intuitive. Cette approche trouve une application particulièrement riche dans la création des expressions corporelles, où la nature expressive des mouvements humains et des gestes dansées représente à la fois un défi et une opportunité pour la robotique.

La création de geste dansée met en jeu des mouvements complexes et délicatement orchestrés qui traduisent émotion et narration, en faisant un terrain idéal pour développer des capacités avancées d'interaction robotique[215] [216] [217]. Le défi ne réside pas seulement dans la reproduction des gestes, mais aussi dans leur exécution de manière intelligente et réactive, en accord avec les indices humains.

215. Aucouturier, JJ. « Using chaos to trade-off synchronization and autonomy in a dancing robot ». Dans : *Trends and Controversies, IEEE Intelligent Systems* 23.2 (2008), p. 74-85.
216. Kosuge, Kazuhiro, Takeda, Takahiro, Hirata, Yasuhisa. « Dancing with a robot : The human leads ». Dans : *IEEE Intelligent Systems* (2008).
217. Qin, Ruilin et al. « A music-driven dance system of humanoid robots ». Dans : *International Journal of Humanoid Robotics* 15.05 (2018), p. 1850023.

Des travaux précédent[218] [219] ont exploré diverses approches d'intégration de méthodes d'IA pour générer des mouvements robotiques, s'appuyant souvent sur des modèles élaborés ou faits main, difficiles à reproduire et à maintenir. Dans cette section, en poursuivant la création des outils pour le HRP-4 afin de présenter une performance robotique dansée, nous explorons la dernière expérimentation de cette thèse : l'usage d'un modèle IA pour produire des séquences de danse sur l'humanoïde HRP 4, tout en restant fidèles à la musique. Cette démarche vise non seulement à discuter de l'interaction autonome entre la danseuse et la machine, comme nous l'avons évoqué dans plusieurs sections précédentes, mais aussi à simplifier le processus d'intégration technique sans sacrifier l'interactivité ni la qualité performative du robot.

En nous appuyant sur un *transformer-based diffusion model*[220], nous générons des mouvements réalistes à partir d'entrées musicales, sans structures complexes. Ces mouvements sont ensuite transformés dans le modèle cinématique (*kinematic model*) du HRP 4, ce qui permet au robot de danser sur des morceaux inédits. Le processus consiste à mapper les informations articulaires générées aux contraintes physiques et aux capacités du HRP 4, garantissant une exécution fluide et représentative.

Nous partageons la conception, la mise en œuvre et l'évaluation du système de génération de danse piloté par IA pour le HRP 4. Nous détaillons la méthodologie d'intégration des mouvements générés dans le cadre de contrôle du robot, le protocole expérimental pour évaluer la performance, et les résultats obtenus. Nous mettons particulièrement l'accent sur la perspective de l'intention artistique, en soulignant la fluidité des mouvements et l'engagement des utilisateurs. En démontrant la capacité du HRP 4 à exécuter des routines de danse générées par l'IA, nous souhaitons passer du rôle du robot de façons significatives de *travailler* avec les humains à des façons significatives de *créer* avec eux.

218. Dong, Ran, Chang, Qiong, Ikuno, Soichiro. « A deep learning framework for realistic robot motion generation ». Dans : *Neural Computing and Applications* 35.32 (2023), p. 23343-23356.
219. Nie, Buqing, Gao, Yue. « DanceHAT : Generate Stable Dances for Humanoid Robots with Adversarial Training ». Dans : *2022 International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. IEEE. 2022, p. 8511-8517.
220. Tseng, Jonathan, Castellon, Rodrigo, Liu, Karen. « Edge : Editable dance generation from music ». Dans : *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. 2023, p. 448-458.

## III.4.1 Modèle de génération de danse basé sur diffusion

La génération de mouvements réalistes et physiquement plausibles pour les robots est un sujet étudié à l'intersection de la *computer vision* et de la robotique. L'étude[221] a mis en évidence l'évolution des interactions humain robot et l'accroissement de la complexité et de la réactivité des systèmes robotiques dans divers contextes. En plus, les chorégraphies générées étaient souvent limitées à des séquences prédéfinies[222], sans capacité d'adaptation dynamique à de nouvelles musiques ou de création en temps réel. Les approches initiales comme Kudoh et al.[223][224] permettaient aux robots d'imiter les mouvements humains par simple observation. D'autres travaux[225] ont développé des technologies de synchronisation rythmique, permettant aux robots de danser avec des enfants, posant ainsi les bases de l'intégration de l'IA dans la danse robotique, en se focalisant sur la fidélité de la réplication et la plausibilité des mouvements.

Récemment, les progrès de l'apprentissage automatique et des modèles génératifs ont considérablement renforcé les capacités de l'IA à crée des mouvement de danse avec des applications prometteuses en robotique. Par exemple, les travaux de Xie et al.[226] et Augello et al.[227] permettent de générer des danses à la fois cohérentes musicalement et physiquement plausibles. Toutefois, ces

221. Aucouturier, Jean-Julien et al. « Cheek to chip : Dancing robots and AI's future ». Dans : *IEEE Intelligent Systems* 23.2 (2008), p. 74-84.
222. Ramos, O et al. « Dynamic whole body motion generation for the dance of a humanoid robot ». Dans : *IEEE Robotics & Automation Magazine (RAM)* (2015), p. 1.
223. Kudoh, Shunsuke et al. « Entertainment robot : Learning from observation paradigm for humanoid robot dancing ». Dans : *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robots Syst. Workshop : Art Robots*. T. 7. 2008.
224. Ramos, Oscar E et al. « Dancing humanoid robots : Systematic use of osid to compute dynamically consistent movements following a motion capture pattern ». Dans : *IEEE Robotics & Automation Magazine* 22.4 (2015), p. 16-26.
225. Michalowski, Marek Piotr. *Rhythmic human-robot social interaction*. Carnegie Mellon University, 2010.
226. Xie, Baijun, Park, Chung Hyuk. « Dance with a robot : Encoder-decoder neural network for music-dance learning ». Dans : *Companion of the 2020 ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction*. 2020, p. 526-528.
227. Augello, Agnese et al. « Creative robot dance with variational encoder ». Dans : *arXiv preprint arXiv :1707.01489* (2017).

méthodes peinaient à gérer la complexité des structures de la danse, nécessitant souvent des conceptions artistiques et intentions artistiques précis. Malgré ces avancées, l'intégration des mouvements générés dans des robots physiques demeure un défi majeur, notamment en matière de planification de mouvement en temps réel, d'équilibre dynamique et de faisabilité pour le matériel du robot. Plusieurs études ont démontré des progrès en synchronisation homme humanoïde, eg.,[228], marche dynamique, eg.,[229] et montée d'escaliers, eg.,[230]. En complément de ces efforts, notre travail garantit l'expressivité artistique en s'appuyant sur un seul modèle *transformer-based diffusion model*[231] et sur le cadre *mc_rtc*, facilitant l'exécution de danses générées par IA sur le HRP 4.

Le défi de favoriser une interaction homme robot signifiante dans un contexte artistique est exploré dans les domaines de la robotique sociale et de l'interaction homme robot (HRI : *human-robot interaction*). Les études initiales[232] se concentraient sur l'aspect fonctionnel de robots expressifs travaillant aux côtés des humains en situation performative, sans aborder profondément le processus créatif. Des recherches récentes se tournent vers le potentiel de co-création des robots. Par exemple, dans notre travail précédent[233], nous avons intégré un robot physique et un écosystème virtuel évolutif dans une performance de danse, où l'interaction entre le danseur et des entités artificielles favorisait une co-création improvisée sur scène. Ce travail met également en lumière le potentiel des systèmes autonomes à contribuer de manière significative à la vision artistique, en participant activement à la scénographie dynamique et au développement des personnages. De même, la

228. Dallard, Antonin et al. « Synchronized human-humanoid motion imitation ». Dans : *IEEE Robotics and Automation Letters* 8.7 (2023), p. 4155-4162.
229. Dallard, Antonin et al. « Robust bipedal walking with closed-loop MPC : Adios stabilizers ». Dans : (2024).
230. Caron, Stéphane, Kheddar, Abderrahmane, Tempier, Olivier. « Stair climbing stabilization of the HRP-4 humanoid robot using whole-body admittance control ». Dans : *2019 International conference on robotics and automation (ICRA)*. IEEE. 2019, p. 277-283.
231. Tseng, Jonathan, Castellon, Rodrigo, Liu, Karen. « Edge : Editable dance generation from music ». Dans : *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. 2023, p. 448-458.
232. Breazeal, Cynthia. « Toward sociable robots ». Dans : *Robotics and autonomous systems* 42.3-4 (2003), p. 167-175.
233. Hong, Huiting et al. « A Cross-Temporal Robotic Dance Performance : Dancing with a Humanoid Robot and Artificial Life ». Dans : *ISEA 2024-29th International Symposium on Electronic Art*. 2024.

recherche[234] sur la danse improvisée homme-robot soulignent l'importance de la spontanéité et de la créativité partagée pour enrichir l'interaction. Par ailleurs, Circu et al.[235] a exploré comment le mouvement rythmique peut améliorer l'interaction sociale entre humains et robots, et Peng et al.[236] montre les différentes manières dont les robots peuvent prendre part aux échanges liés à la danse.

Malgré ces avancées, l'exploration des robots en tant que co-créateurs plutôt que simples exécutants en est encore à ses débuts. Dans notre travail[237], nous avons développé un système interactif en temps réel basé sur les gestes permettant au HRP-4 de réagir dynamiquement aux mouvements de la danseuse, créant des gestes artistiquement significatifs sans capteurs portés. Cette approche met en lumière non seulement les aspects techniques, mais aussi l'improvisation guidée par la perception, moteur de l'expression artistique dans la danse homme robot. Dans ce travail, en collaborant étroitement avec la danseuse, nous explorons comment les mouvements générés par l'IA peuvent être affinés et adaptés à la vision artistique. Ce processus collaboratif enrichit l'expérience créative tant pour les artistes que pour le public, et démontre le potentiel de l'IA et des robots à devenir des participants actifs, plutôt que de simples outils ou exécutants.

234. Thörn, Oscar, Knudsen, Peter, Saffiotti, Alessandro. « Human-robot artistic co-creation : a study in improvised robot dance ». Dans : *2020 29th IEEE International conference on robot and human interactive communication (RO-MAN)*. IEEE. 2020, p. 845-850.

235. Circu, Sorina-Silvia et al. « Dance, dance, dance with my hands : Third-party human robot-human interactions ». Dans : *2023 32nd IEEE International Conference on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN)*. IEEE. 2023, p. 1997-2002.

236. Peng, Hua et al. « Robotic dance in social robotics—a taxonomy ». Dans : *IEEE Transactions on Human-Machine Systems* 45.3 (2015), p. 281-293.

237. Hong, Hui-Ting et al. « A Dance Performance with a Humanoid Robot using a Real-time Gesture Responsive Framework ». Dans : *2024 33rd IEEE International Conference on Robot and Human Interactive Communication (ROMAN)*. IEEE. 2024, p. 1550-1555.

### III.4.2 Mapping cinématique et adaptation au HRP-4

Nous utilisons un modèle de génération[238] *open-source*[239] reposant sur un *transformer-based diffusion model* associé à Jukebox, un extracteur de caractéristiques musicales performant, afin de générer de mouvements réalistes et physiquement plausibles, la structure de cette modèle est illustré dans la Fig . III.4.1. Ce modèle adopte le format *SMPL*[240] à 24 articulations avec représentation de rotation en *6-DOF*[241].

Le processus commence par l'extraction de caractéristiques depuis le fichier audio, suivie d'un modèle de diffusion qui synthétise les mouvements en fonction des caractéristiques musicales. Entraîné sur un vaste dataset couplant musique et danse[242], ce réseau apprend les relations entre caractéristiques sonores et mouvements. Grâce à ce modèle unique, nous générons les mouvements nécessaires pour le HRP 4 sans architectures complexes ou difficiles à maintenir.

Nous transmettons les informations extraites du modèle SMPL sur 24 articulations, incluant les rotations et les positions, via des *publishers* ROS[243] à une fréquence de 12Hz vers un contrôleur personnalisé basé sur `mc_rtc`. Ce contrôleur

238. Tseng, Jonathan, Castellon, Rodrigo, Liu, Karen. « Edge : Editable dance generation from music ». Dans : *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. 2023, p. 448-458.

239. https://github.com/Stanford-TML/EDGE

240. Loper, Matthew et al. « SMPL : A skinned multi-person linear model ». Dans : *Seminal Graphics Papers : Pushing the Boundaries, Volume 2*. 2023, p. 851-866.

241. Zhou, Yi et al. « On the continuity of rotation representations in neural networks ». Dans : *Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition*. 2019, p. 5745-5753.

242. Le AIST++ Dataset est construit à partir de la AIST Dance Video DB (Tsuchida, Shuhei et al. « AIST Dance Video Database : Multi-genre, Multi-dancer, and Multi-camera Database for Dance Information Processing ». Dans : *Proceedings of the 20th International Society for Music Information Retrieval Conference, ISMIR 2019*. Delft, Netherlands, nov. 2019, p. 501-510) et fournit des annotations de points clés humains en 3D et des paramètres de caméra pour 10,1 millions d'images, couvrant 30 sujets différents en 9 vues. Il comprend également 1 408 séquences de mouvements de danse humaine en 3D, distribuées parmi 10 genres de danse, avec toutes les mouvements accompagnés de musique. Ce dataset soutient des tâches telles que l'estimation de points clés humains multi-views, la prédiction/génération de mouvements humains, et l'analyse multi-modale entre le mouvement humain et la musique. Dans le cadre d'un effort de recherche financé, les danseurs sont bien rémunérés pour leur participation, assurant une qualité de performance professionnelle.

243. En ROS (Robot Operating System), un « publisher » (éditeur) et un « subscriber » (abonné) sont des composants clés du système de communication basé sur les sujets (topics). Un publisher est un nœud qui envoie des messages sur un sujet spécifique. Par exemple, un nœud qui publie des données de capteur sur un sujet peut être considéré comme un publisher. Un subscriber est un nœud qui écoute et reçoit des messages d'un sujet spécifique. Par exemple, un nœud qui utilise les données de capteur publiées par un autre nœud serait un subscriber. Ces mécanismes permettent une communication efficace et décentralisée entre les différents composants d'un système robotique.

TABLE III.4.1 – The mapping between the HRP-4 and SMPL body model

| **HRP-4 Body Segments** | **SMPL Body Segments** |
|---|---|
| body | m_avg_Pelvis |
| torso | m_avg_Spine1 |
| NECK_P_LINK | m_avg_Neck |
| R_SHOULDER_R_LINK | m_avg_R_Shoulder |
| R_SHOULDER_Y_LINK | m_avg_R_Shoulder |
| R_ELBOW_P_LINK | m_avg_R_Elbow |
| r_wrist | m_avg_R_Hand |
| L_SHOULDER_R_LINK | m_avg_L_Shoulder |
| L_SHOULDER_Y_LINK | m_avg_L_Shoulder |
| L_ELBOW_P_LINK | m_avg_L_Elbow |
| l_wrist | m_avg_L_Hand |
| R_HIP_P_LINK | m_avg_R_Hip |
| R_KNEE_P_LINK | m_avg_R_Knee |
| r_ankle | m_avg_R_Ankle |
| L_HIP_P_LINK | m_avg_L_Hip |
| L_KNEE_P_LINK | m_avg_L_Knee |
| l_ankle | m_avg_L_Ankle |

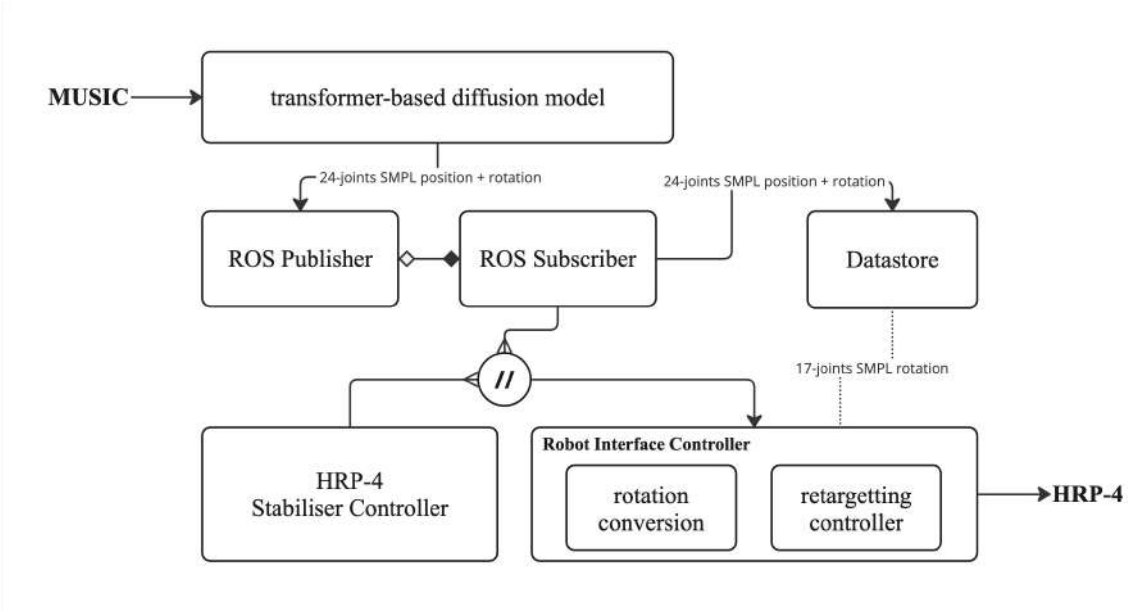



FIGURE III.4.1 – The structure of integrating AI-generated movements into the robot's control framework

est conçu pour *subscribe* au topic ROS diffusant les données SMPL, puis les traiter pour le robot HRP-4. À la réception de ces données, le contrôleur extrait les angles et positions des 24 articulations, et applique une conversion des rotations 6 degrés de liberté (6-DOF)[244] en rotations à 3 degrés de liberté (3-DOF), afin de les adapter à l'espace articulaire du HRP-4. Concernant la correspondance entre les articulations du robot HRP-4 et celles du modèle SMPL, 17 des 24 articulations ont été associées à leurs équivalents anatomiques les plus proches sur le HRP-4. Cette correspondance vise à garantir que les mouvements générés par l'IA puissent être reproduits de manière fidèle par le robot. Le tableauIII.4.1 présente les articulations correspondantes.

Le contrôleur intègre également un contrôleur de stabilisation[245] et un contrôleur de *retargeting*, permettant au robot de maintenir son équilibre lors de l'exécution des

244. ZHOU, Yi et al. « On the continuity of rotation representations in neural networks ». Dans : *Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition*. 2019, p. 5745-5753.
245. CARON, Stéphane, KHEDDAR, Abderrahmane, TEMPIER, Olivier. « Stair climbing stabilization of the HRP-4 humanoid robot using whole-body admittance control ». Dans : *2019 International conference on robotics and automation (ICRA)*. IEEE. 2019, p. 277-283.

mouvements. Le contrôleur de stabilisation garantit que le robot HRP-4 reste stable et ne chute pas pendant les mouvements dynamiques. Compte tenu des limitations mécaniques du HRP-4, nous avons mis en place un filtrage de position et appliqué un contrôle dynamique de faible intensité, centré principalement sur l'information rotationnelle, au sein du contrôleur de *retargeting*. Cette approche permet de s'assurer que les mouvements du robot restent dans ses limites de fonctionnement sûres, tout en reproduisant fidèlement les séquences de danse générées par l'IA.

### III.4.3 Intégration en temps réel et retour d'expérience artistique

Nos expérimentations se sont déroulées en étroite collaboration avec la danseuse afin d'ouvrir la discussion que les mouvements IA soient non seulement techniquement solides mais aussi artistiquement pertinents. Dans chaque expérience, une pièce musicale était jouée, le HRP-4 exécutait les mouvements correspondants générés par le modèle, et une danseuse improvisait aux côtés du robot, illustré en Fig. III.4.2. En raison de limitations, les expériences n'ont pas pu être réalisées directement sur le robot : elles ont donc été menées en simulation à l'aide de l'outil open-source `mc_mujoco`.

Nous avons sélectionné des morceaux aux qualités rythmiques et émotionnelles variées pour tester un large éventail de dynamiques de mouvement et d'expressions. Ces morceaux étaient ensuite utilisés comme entrée pour ce modèle de diffusion basé sur des transformeurs, qui générait des séquences de danse correspondantes. Les séquences obtenues étaient ensuite *retargetting* aux capacités physiques du HRP-4, afin d'assurer que les mouvements restent exécutables tout en préservant l'intention artistique de la chorégraphie.

Lors de la phase initiale des expérimentations, une danseuse a observé les mouvements du robot HRP-4 et a fourni un retour sur la fluidité, l'expressivité et l'esthétique générale de la danse. Cette phase d'observation est cruciale dans le processus de création du geste dansée, en particulier en improvisation. Contrairement à la création spontanée, l'improvisation en geste dansée nécessite souvent un contexte ou un cadre, acquis par l'observation (ou d'autres sens comme le goût, l'odorat ou l'ouïe), sur lequel s'appuyer pour initier et développer le mouvement. Ce retour a donc été essentiel pour affiner le modèle afin qu'il corresponde mieux aux attentes artistiques.

Par la suite, la danseuse a participé à des sessions d'improvisation avec le robot, explorant comment les mouvements générés par l'IA pouvaient inspirer et influencer

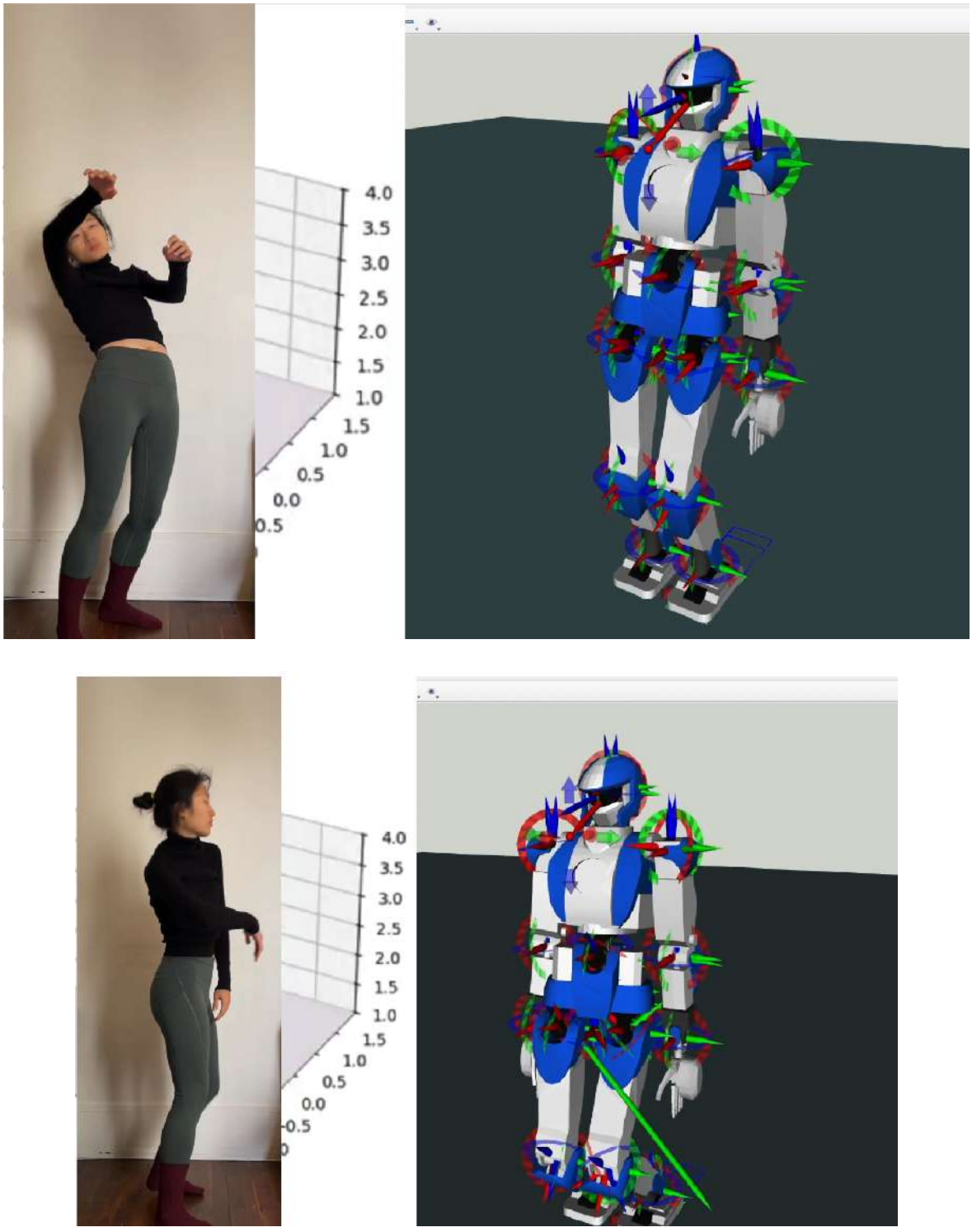



FIGURE III.4.2 – Une danseuse improvisée aux côtés du HRP-4.

sa propre geste. Lors de cette session de co-création entre l'humain et le robot, la danseuse a d'abord reproduit les mouvements du robot afin d'établir une connexion rythmique et spatiale. Cette phase de mimétisme lui a permis de comprendre le vocabulaire gestuel du robot et d'adapter son improvisation en conséquence. À mesure que la session progressait, il a commencé à introduire des variations et des interprétations personnelles des mouvements, créant ainsi un dialogue dynamique entre l'humain et le robot.

La danseuse a notamment souligné que la précision et la répétitivité des mouvements du robot constituaient un point d'ancrage stable, lui permettant d'explorer des expressions plus fluides et improvisées. Elle a également remarqué que certains mouvements, en particulier ceux comportant des transitions complexes, l'amenaient à réfléchir de manière créative à la manière de maintenir une harmonie avec la performance du robot. Plusieurs points ont émergé de la co-création entre la danseuse et le HRP-4 : premièrement, les mouvements du robot, à la fois prévisibles et variés, ont constitué une source d'inspiration, incitant la danseuse à expérimenter de nouvelles techniques d'improvisation. Deuxièmement, la présence du robot a introduit un élément d'imprévisibilité et d'excitation, obligeant la danseuse à s'adapter en permanence au rythme et à la position spatiale du HRP-4. Troisièmement, la danseuse a ressenti un sentiment de la poursuite continue d'un rythme partagé, où humain et robot contribuaient ensemble à l'évolution de la création des gestes dansées. Ces réflexions ont permis de mieux comprendre la dynamique des interactions humain-robot dans un contexte performatif et ont offert des pistes pour de futures améliorations. Par ailleurs, les mouvements générés par l'IA ont été globalement bien accueillis, la danseuse notant un fort degré de synergie artistique durant les sessions d'improvisation. Les retours ont indiqué que, bien que les mouvements soient techniquement maîtrisés, il restait des points à améliorer, notamment en ce qui concerne l'expressivité, en particulier lors des transitions entre les mouvements.

L'improvisation de la danseuse a été visiblement influencée par les mouvements du robot, témoignant d'un échange bidirectionnel. Ces résultats soulignent le

potentiel des mouvements générés par l'IA à enrichir la co-création homme-robot, tout en mettant en lumière l'importance d'un retour continu de la danseuse pour affiner les modèles d'IA en fonction des exigences artistiques et scéniques.

Notre travail démontre le potentiel des mouvements générés par IA à faciliter une collaboration artistique entre robots et humains. L'intégration de la méthode[246] sur le HRP 4 permet la création d'interactions de geste dansée avec la danseuse. Cette approche marque un virage vers la co-création active plutôt que la simple assistance fonctionnelle, ouvrant ainsi la voie à de nouvelles explorations dans les domaines artistique et créatif, où les robots pourraient un jour devenir des acteurs à part entière des pratiques humaines.

Cette dernier section met en avant la faisabilité d'un seul modèle pour produire des mouvements fidèles à la musique, simplifiant l'intégration tout en préservant le potentiel expressif du mouvement du robot. Les recherches futures viseront à affiner le design d'interaction et à explorer plus avant les possibilités créatives offertes par les mouvements générés par IA.

246. Tseng, Jonathan, Castellon, Rodrigo, Liu, Karen. « Edge : Editable dance generation from music ». Dans : *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. 2023, p. 448-458.

# Conclusion

La troisième partie de la thèse discute concrétement d'un developpement et co-création pour une performance robotique dansée. Il s'agit une performance entre un robot humanoïde de taille humaine et une chorégraphique, en réponse à un double défi : assurer une interaction improvisée fluide, tout en garantissant la sécurité et la stabilité technique du robot, et l'accessibilité de ces outils aux communautés artistes.

Nous soulignons d'abord les enjeux spécifiques liés à l'intégration de robots humanoïdes dans les spectacles vivants. Ces machines, initialement conçues pour des usages industriels, n'ont pas été pensées pour l'expression corporelle ni pour une performance sur la scène en temps réel. Leur rareté, leur coût élevé et leur fragilité technique limitent leur usage scénique à des démonstrations ponctuelles, souvent déconnectées d'un projet de recherche-création. Notre projet CECCI-H2M a permis, sous ces contraintes et conditions exigeantes, de challenger ces limites en développant une approche intégrée à la fois technique, artistique et expérimentale autour du robot HRP-4.

Nous détaillons ensuite la conception et le development d'un système interactif temps réel, le GD-HRIF (nommé *Gesture Dancing Humanoid Robot Interactive Framework*), développé sur un framework open-source mc_rtc. Ce système repose sur une architecture modulaire combinant un module de reconnaissance visuelle des gestes (via caméra embarquée et MediaPipe), une fonction de policy adaptative, et des contrôleurs robotiques spécialisés. La machine ne répond pas de manière prédéfinie : elle sélectionne dynamiquement, via une fonction de score, les mouvements qui optimisent à la continuité expressive. Ce choix garantit une interaction improvisée sans compromettre la stabilité du robot.

Lorsque nous mettons en scène l'implémentation de ce système dans une performance dansée originale, chaque geste de la danseuse influence le robot en temps réel. Cette interaction repose sur une étroite collaboration entre ingénieurs, metteuse en scène, la danseuse et creative technologists, dans un processus de co-construction dramaturgique. Quatre contrôleurs robotiques — posture, stabilisation, machine à états, retargeting — ont été également développés pour offrir des marges d'improvisation tout en garantissant une exécution sécurisée.

Enfin, nous introduisons une extension vers la génération de mouvements dansés via intelligence artificielle, notamment à partir de musique. Un modèle de type transformateur, couplé à un extracteur de caractéristiques musicales, permet de générer des séquences chorégraphiques, adaptables aux contraintes physiques du robot. L'évaluation artistique avec une danseuse a permis de réajuster les paramètres de génération afin de mieux répondre aux attentes expressives. Ce volet ouvre une nouvelle voie : celle d'une autonomie créative du robot non seulement réactive, mais aussi générative.

Cette troisième partie de la thèse apporte des éléments de réponse concrets à la problématique suivante : comment concevoir un système interactif suffisamment flexible pour favoriser l'improvisation, tout en conservant la stabilité nécessaire à un robot humanoïde, et en rendant ces outils accessibles à une communauté d'artistes ? Le système GD-HRIF développé dans le cadre de cette thèse repose sur une architecture modulaire qui permet une interaction sensible et non déterministe avec un robot humanoïde en temps réel. Grâce à une reconnaissance gestuelle non-invasive et à une logique d'interprétation adaptative, le robot peut participer à une improvisation scénique sans suivre de script prédéfini, tout en conservant un haut niveau de stabilité grâce à l'intégration de contrôleurs robustes assurant la posture, l'équilibre et la sécurité. Par ailleurs, le recours à des technologies accessibles (mc_rtc, Python, interface graphique) et la collaboration étroite entre ingénieurs, chorégraphes et creative technologists ouvrent la voie à une démocratisation de ces outils au sein de la communauté artistique.

# Conclusion

# Conclusion Générale

Cette thèse s'est construite à la croisée de deux mondes que tout semblait initialement opposer : celui de l'expression corporelle improvisée, profondément enracinée dans une tradition artistique sensible, et celui de la robotique, souvent perçu comme un domaine fondé sur la rationalité, la précision et la prédictibilité. Pourtant, à travers un cheminement progressif mêlant réflexions théoriques, expérimentations artistiques et développements technologiques, ce travail a tenté de répondre à trois problématiques fondamentales : comment imaginer une boucle de co-création gestuelle entre l'homme et la machine ? Comment établir un langage gestuel sensible qui permet à la machine de dialoguer avec des expressions corporelles improvisées ? Et enfin, comment concevoir un système qui favorise l'improvisation, et en même temps garantisse la stabilité d'un robot humanoïde tout en rendant cet outil accessible à une communauté d'artistes ? Cette thèse de recherche-création a montré que ces deux mondes : celui de l'expression corporelle et celui de l'ingénierie robotique, pouvaient non seulement dialoguer, mais aussi co-créer ensemble.

À travers des réflexions, expérimentations artistiques et développement technologique, cette thèse propose une nouvelle vision de la machine dans le champ des expressions corporelles improvisées : non plus objet passif ou automate spectaculaire, mais partenaire de création, capable de dialoguer corporellement dans un espace partagé d'incertitude et d'improvisation. Elle réaffirme que l'expressivité d'une machine, notamment un robot, ne tient pas uniquement à la complexité des mouvements, mais à la qualité de la relation qui s'instaure, à la capacité d'écoute mutuelle, et à l'ouverture à l'imprévisible.

Ce qui nous a retenus, c'est que l'expression corporelle, loin d'être une simple commande adressée à une machine, est comme une porte d'entrée vers un échange actif, un espace de co-création sensible et imprévisible. Le geste dansé y est également envisagé comme une entité dynamique, à la fois porteuse d'intention et d'ouverture. La notion d'inter-actions — avec un trait d'union — que nous avons introduite au fil de cette recherche souligne ce déplacement : bien que l'interactivité mette l'accent sur la réactivité du système, les inter-actions désignent des actions autonomes et résonantes qui émanent à la fois de l'humain et de la machine. Ainsi, l'objectif n'est pas de simuler l'intelligence ni de reproduire un comportement humain, mais de comprendre comment les gestes improvisés et les processus computationnels peuvent co-produire du rythme situé et une expressivité à la fois cognitive et artistique.

Durant l'exploration d'un corpus d'expressions corporelles improvisées issues de l'interaction avec des objets d'art, un langage gestuel sensible a été forgé, qui nous a permis de confronter un écosystème virtuel, et que ce langage gestuel devient un premier matériau d'une mise en dialogue avec la machine. Ces gestes improvisés, non pré-codés et non reproductibles, surgissent dans l'instant, ancrés dans la relation à l'espace et à la situation. Cette approche a souligné une logique de relation vivante, d'improvisation partagée et d'écoute mutuelle. L'expérimentation scénique « Le Mythe d'Immorta » a ainsi montré qu'un système pouvait devenir une présence numérique évolutive, capable d'influencer et d'être influencée, et de co-créer avec la danseuse dans un espace partagé de co-présence dynamique, où chaque geste dansé est une proposition libre à imaginer. Cet espace partagé a permis de valider la faisabilité d'un dialogue improvisé entre geste dansé improvisé et entité numérique.

Lorsque nous avons ensuite transposé cette approche d'expressions corporelles improvisées dans un corps mécanique réel : celui du robot humanoïde HRP-4, nous avons posé en même temps les fondements d'un paradigme en considérant que le robot peut devenir un partenaire scénique à part entière, capable d'écouter, de proposer, et de s'engager dans une interaction incarnée et imprévisible.

L'intégration d'un robot de taille humaine dans le processus de création d'une

performance robotique dansée avec une danseuse sur la scène a exigé la conception d'un framework interactif dédié : GD-HRIF, que nous avons développé, basé sur mc_rtc, repose sur une architecture modulaire intégrant la reconnaissance visuelle des postures, une *policy function* gestuelle, ainsi que plusieurs contrôleurs permettant un arbitrage entre expressivité et sécurité. L'enjeu était de générer des comportements moteurs adaptatifs, sans mouvements prédéfinis, à partir d'une logique décisionnelle inspirée de l'apprentissage par renforcement — mais revisité à travers une approche énactive. C'est précisément à ce croisement que s'est révélée : l'apprentissage par renforcement, tel qu'implémenté en IA, repose sur une séquence linéaire de perception → action → récompense. Or, dans une performance dansée improvisée, cette direction linéaire doit être réinterprétée comme un cycle et une co-évolution constante du geste dansé. Il ne s'agit plus de maximiser une fonction de récompense, mais de cultiver un terrain d'expression corporelle partagée, où la machine découvre avec l'humain des trajectoires sensorielles non anticipées. Dans cette perspective, la *policy function* n'est plus un algorithme d'optimisation, mais un moteur de variation incarnée. GD-HRIF a permis de concilier les exigences de stabilité robotique avec les nécessités d'une improvisation scénique en temps réel. En surmontant deux défis techniques majeurs : maintenir la stabilité physique du robot en situation d'improvisation chorégraphique, et permettre à des artistes de s'approprier le système dans un contexte de création de spectacle vivant, cette conception et ce développement technique modulaires, fondés sur l'interprétation gestuelle adaptative, ont rendu possible une interaction sensible entre la danseuse et le robot, tout en rendant ces outils accessibles à une communauté artistique.

Si nous le regardons de loin, il est courant d'évoquer le développement de l'intelligence artificielle, notamment son potentiel à remplacer le travail humain. Cependant, l'enjeu fondamental ne réside pas, à mon avis, seulement dans le nombre d'emplois susceptibles d'être supprimés — souvent des tâches routinières et répétitives — mais dans les effets plus profonds de cette substitution sur notre capacité à la pensée réflexive. À une époque où l'habitude de la réflexion critique

est de plus en plus menacée, il convient de se demander si notre génération sera capable d'orienter consciemment l'évolution de l'IA au cours de la prochaine décennie. À mes yeux, l'amélioration constante des algorithmes d'intelligence artificielle se poursuit précisément parce qu'une intégration dans la vie quotidienne reste une perspective lointaine. Cela est particulièrement manifeste dans le domaine des environnements virtuels, où l'on tente de reproduire fidèlement le monde réel. Pourtant, ingénieurs et développeurs se concentrent avant tout sur la nouveauté — poussant les limites de l'inconnu — plutôt que de s'interroger sur les modes de vie que l'humanité pourrait ou devrait adopter dans les décennies à venir.

Si l'humanité cesse d'exercer son esprit critique, la question ne sera pas de savoir si l'IA a la capacité de prendre le contrôle, mais plutôt si les conditions lui permettront de le faire pleinement. Dès lors, la substitution du travail humain par la technologie de l'IA n'est qu'un symptôme d'un bouleversement bien plus profond.

Cette thèse, intitulée *D'une expression corporelle improvisée à la co-création d'une performance robotique dansée : recherche, création et développement des outils pour un robot humanoïde*, ne se limite pas à une contribution technique ou artistique. Elle propose un changement de paradigme dans notre manière de concevoir l'interaction homme-machine : une interaction fondée sur la co-émergence du geste, sur la temporalité partagée, et sur la possibilité, pour la machine comme pour l'humain, de se laisser transformer par l'autre. À mesure que ces technologies gagnent en maturité, les domaines de la performance artistique robotique et de la co-création homme-machine continueront d'évoluer. Le travail présenté ici invite à poursuivre l'exploration et le dialogue, ouvrant ainsi la voie à un futur où la création chorégraphique pourra s'enrichir de nouveaux partenaires robotiques — non pour les remplacer, mais pour mieux questionner, explorer et étendre les langages du corps dansant.

# Bibliographie

# Bibliographie

## Livres


[1] Asimov, Isaac. *I, robot*. T. 1. Spectra, 2004.

[2] Auslander, Philip. *Liveness : Performance in a mediatized culture*. Routledge, 2022.

[3] Bartenieff, Irmgard, Davis, Martha. *Effort-shape Analysis of Movement : The Unity of Expression and Function. By Irmgard Bartenieff, Martha Ann Davis*. Albert Einstein College of Medicine, Yeshiva University, 1965.

[4] Bartenieff, Irmgard, Lewis, Dori. *Body Movement : Coping with the Environment*. Routledge, 1980.

[5] Bernstein, N. *The Co-ordination and Regulation of Movements*. Pergamon Press, 1967. isbn : 9780080119403. url : https://books.google.fr/books?id=mUhzjwEACAAJ.

[6] Berthoz, Alain. *Le sens du mouvement*. Odile Jacob, 1997.

[7] Bourriaud, Nicolas. *Relational aesthetics*. Les presses du réel, 2020.

[8] Brown, Carolyn. *Chance and circumstance : twenty years with Cage and Cunningham*. Knopf, 2009.

[9] Chacon, Scott, Straub, Ben. *Pro git*. Springer Nature, 2014.

[10] Climenhaga, Royd. *Pina Bausch*. Routledge, 2008.

[11] Climenhaga, Royd. *The Pina Bausch Sourcebook : The Making of Tanztheater*. Routledge, 2012.

[12] Copeland, Roger. *Merce Cunningham : the modernizing of modern dance*. Routledge, 2004.

[13] Couchot, Edmond. *Automates, robots et humains virtuels dans les arts vivants*. Presses universitaires de Vincennes, 2022.

[14] Davies, Eden. *Beyond dance : Laban's legacy of movement analysis*. Routledge, 2007.

[15] Dixon, Steve. *Digital performance : a history of new media in theater, dance, performance art, and installation*. MIT press, 2015.

[16] Duncan, Isadora. *My life*. Liveright, 2013.

[17] Featherstone, Roy. *Rigid body dynamics algorithms*. Springer, 2014.

[18] Lepecki, André. *Exhausting dance : Performance and the politics of movement*. Routledge, 2006.

[19] Maletic, Vera. *Body, space, expression : The development of Rudolf Laban's movement and dance concepts*. T. 75. Walter de Gruyter, 1987.

[20] Merleau-Ponty, Maurice. *Phénoménologie de la perception*. fr. Paris, France : Gallimard, mai 1976.

[21] Michalowski, Marek Piotr. *Rhythmic human-robot social interaction*. Carnegie Mellon University, 2010.

[22] Minton, Sandra Cerny. *Choreography : a basic approach using improvisation*. Human Kinetics, 2017.

[23] Moravec, Hans. *Mind children : The future of robot and human intelligence*. Harvard University Press, 1988.

[24] Roquet, Christine. *Vu du geste : interpréter le mouvement dansé*. Centre national de la danse, 2020.

[25] Rosenberg, Susan. *Trisha Brown : choreography as visual art*. Wesleyan University Press, 2016.

[26] Schechner, Richard. *Performance theory*. Routledge, 2003.

[27] Stroustrup, Bjarne. *The C++ programming language*. Pearson Education, 2013.

[28] Van Rossum, Guido, Drake Jr, Fred L. *Python tutorial*. T. 620. Centrum voor Wiskunde en Informatica Amsterdam, The Netherlands, 1995.

[29] Varela, Francisco J, Rosch, Eleanor, Thompson, Evan. *The Embodied Mind*. en. The MIT Press, sept. 1991.

## Chapitres de livre

[30] Cosentino, Sarah, Takanishi, Atsuo. « Human–robot musical interaction ». Dans : *Handbook of Artificial Intelligence for Music : Foundations, Advanced Approaches, and Developments for Creativity*. Springer, 2021, p. 799-822.

[31] Loper, Matthew et al. « SMPL : A skinned multi-person linear model ». Dans : *Seminal Graphics Papers : Pushing the Boundaries, Volume 2*. 2023, p. 851-866.

[32] Tramus, M-H, Bret, M, Couchot, E. « La seconde interactivité ». Dans : *Arte e vida no século XXI, Tecnologia, ciência criatividade*. Sous la dir. de Brésil Unesp. 2004.

## Articles

[33] Agravante, Don Joven et al. « Collaborative human-humanoid carrying using vision and haptic sensing ». Dans : *2014 IEEE international conference on robotics and automation (ICRA)*. IEEE. 2014, p. 607-612.

[34] Ahmad, Norhafizan et al. « Reviews on various inertial measurement unit (IMU) sensor applications ». Dans : *International Journal of Signal Processing Systems* 1.2 (2013), p. 256-262.

[35] Angelaki, Dora E, Cullen, Kathleen E. « Vestibular system : the many facets of a multimodal sense ». Dans : *Annu. Rev. Neurosci.* 31.1 (2008), p. 125-150.

[36] Asimov, Isaac. « Runaround ». Dans : *Astounding science fiction* 29.1 (1942), p. 94-103.

[37] Aucouturier, Jean-Julien et al. « Cheek to chip : Dancing robots and AI's future ». Dans : *IEEE Intelligent Systems* 23.2 (2008), p. 74-84.

[38] Aucouturier, JJ. « Using chaos to trade-off synchronization and autonomy in a dancing robot ». Dans : *Trends and Controversies, IEEE Intelligent Systems* 23.2 (2008), p. 74-85.

[39] Augello, Agnese et al. « Creative robot dance with variational encoder ». Dans : *arXiv preprint arXiv :1707.01489* (2017).

[40] Bazarevsky, Valentin et al. « Blazepose : On-device real-time body pose tracking ». Dans : *arXiv preprint arXiv :2006.10204* (2020).

[41] Beer, Jenay M, Fisk, Arthur D, Rogers, Wendy A. « Toward a framework for levels of robot autonomy in human-robot interaction ». Dans : *Journal of human-robot interaction* 3.2 (2014), p. 74.

[42] Bouyarmane, Karim, Kheddar, Abderrahmane. « On weight-prioritized multitask control of humanoid robots ». Dans : *IEEE Transactions on Automatic Control* 63.6 (2017), p. 1632-1647.

[43] Breazeal, Cynthia. « Toward sociable robots ». Dans : *Robotics and autonomous systems* 42.3-4 (2003), p. 167-175.

[44] Bret, Michel, Tramus, Marie-Hélène, Berthoz, Alain. « Creation no. 2. La Funambule virtuelle, Michel Bret, Marie-Hélène Tramus, Alain Berthoz ». Dans : *Hybrid. Revue des arts et médiations humaines* 2 (2015).

[45] Bret, Michel, Tramus, Marie-Hélène, Berthoz, Alain. « Interacting with an intelligent dancing figure : artistic experiments at the crossroads between art and cognitive science ». Dans : *Leonardo* 38.1 (2005), p. 46-53.

[46] Caron, Stéphane, Kheddar, Abderrahmane, Tempier, Olivier. « Stair climbing stabilization of the HRP-4 humanoid robot using whole-body admittance control ». Dans : *2019 International conference on robotics and automation (ICRA)*. IEEE. 2019, p. 277-283.

[47] Chen, Chu-Yin. « Un monde pleinement énacté ». Dans : *Action, énaction : l'émergence de l'œuvre d'art* (2017), p. 53-76.

[48] Chen, Feiyu et al. « WristCam : A wearable sensor for hand trajectory gesture recognition and intelligent human–robot interaction ». Dans : *IEEE Sensors Journal* 19.19 (2018), p. 8441-8451.

[49] Chen, Feiyu et al. « WristCam : A Wearable Sensor for Hand Trajectory Gesture Recognition and Intelligent Human–Robot Interaction ». Dans : *IEEE Sensors Journal* 19.19 (2019), p. 8441-8451. doi : 10.1109/JSEN.2018.2877978.

[50] Chen, Xin. « "Calligraphy" and "Qi" from the Perspective of Philosophy of Information—From the Perspective of Chinese Calligraphy Theory ». Dans : *Proceedings*. T. 81. 1. MDPI. 2022, p. 142.

[51] Cifuentes, Carlos A et al. « Human–robot interaction based on wearable IMU sensor and laser range finder ». Dans : *Robotics and Autonomous Systems* 62.10 (2014), p. 1425-1439.

[52] Circu, Sorina-Silvia et al. « Dance, dance, dance with my hands : Third-party human robot-human interactions ». Dans : *2023 32nd IEEE International Conference on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN)*. IEEE. 2023, p. 1997-2002.

[53] Clément, Fabrice. « Quel savoir pour l'éthique ? Action, sagesse et cognition (Francisco Varela) ». Dans : *Réseaux. Communication-Technologie-Société* 15.84 (1997), p. 171-173.

[54] Costa, Isadora Teles de Castro E, Hong, Hui-Ting, Chen, Chu-Yin. « A performance co-created with an autonomous virtual system : A symbiotic approach ». Dans : *International Symposium on Electronic Arts [ISEA2023]*. 2023.

[55] Dallard, Antonin et al. « Robust bipedal walking with closed-loop MPC : Adios stabilizers ». Dans : (2024).

[56] Dallard, Antonin et al. « Synchronized human-humanoid motion imitation ». Dans : *IEEE Robotics and Automation Letters* 8.7 (2023), p. 4155-4162.

[57] Dong, Ran, Chang, Qiong, Ikuno, Soichiro. « A deep learning framework for realistic robot motion generation ». Dans : *Neural Computing and Applications* 35.32 (2023), p. 23343-23356.

[58] Frank, Marguerite, Wolfe, Philip et al. « An algorithm for quadratic programming ». Dans : *Naval research logistics quarterly* 3.1-2 (1956), p. 95-110.

[59] Gagneré, Georges. « AKN_Regie : une passerelle entre arts numériques et spectacle vivant ». Dans : *Frontières numériques. Actes du 5ème colloque international sur les frontières numériques (2023)*. Europia. 2024, p. 272-282.

[60] Gasparetto, Allesandro, Scalera, Lorenzo. « From the unimate to the delta robot : the early decades of industrial robotics ». Dans : *Explorations in the History and Heritage of Machines and Mechanisms : Proceedings of the 2018 HMM IFToMM Symposium on History of Machines and Mechanisms*. Springer. 2019, p. 284-295.

[61] Graham, Martha. « Blood memory ». Dans : *New york* (1991).

[62] Gunning, Tom. « Loie fuller and the art of motion ». Dans : *La Decima Musa. Il cinema e le altre arti* (2001), p. 25-35.

[63] Helbo, André, Légeret, Katia LK. « L'expérience muséale comme traduction ». Dans : *Danser Nyota INyoka et autres médiations artistiques au musée* (2021).

[64] Hoghe, Raimund. « Pina Bausch : histoires de théâtre dansé ». Dans : *(No Title)* (1987).

[65] Hong, Hui-Ting et al. « A Dance Performance with a Humanoid Robot using a Real-time Gesture Responsive Framework ». Dans : *2024 33rd IEEE International Conference on Robot and Human Interactive Communication (ROMAN)*. IEEE. 2024, p. 1550-1555.

[66] Hong, Huiting et al. « A Cross-Temporal Robotic Dance Performance : Dancing with a Humanoid Robot and Artificial Life ». Dans : *ISEA 2024-29th International Symposium on Electronic Art*. 2024.

[67] Humphrey, Doris. « The art of making dances ». Dans : (1959).

[68] Jawale, Pratiksha Prakash, Ohol, Shantipal S. « Improvisation in Human–Robot Interaction Using Optimized Multimodal Operational Techniques ». Dans : *International Conference on Electrical and Electronics Engineering*. Springer. 2023, p. 403-413.

[69] Kajita, Shuuji et al. « Cybernetic human hrp-4c : A humanoid robot with human-like proportions ». Dans : *Robotics Research : The 14th International Symposium ISRR*. Springer. 2011, p. 301-314.

[70] Kajita, Shuuji et al. « The 3D linear inverted pendulum mode : A simple modeling for a biped walking pattern generation ». Dans : *Proceedings 2001 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Expanding the Societal Role of Robotics in the the Next Millennium (Cat. No. 01CH37180)*. T. 1. IEEE. 2001, p. 239-246.

[71] Kaneko, Kenji et al. « Cybernetic human HRP-4C ». Dans : *2009 9th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*. IEEE. 2009, p. 7-14.

[72] Kaneko, Kenji et al. « Humanoid robot HRP-3 ». Dans : *2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. IEEE. 2008, p. 2471-2478.

[73] Kheddar, Abderrahmane et al. « Humanoid robots in aircraft manufacturing : The airbus use cases ». Dans : *IEEE Robotics & Automation Magazine* 26.4 (2019), p. 30-45.

[74] Kosuge, Kazuhiro, Takeda, Takahiro, Hirata, Yasuhisa. « Dancing with a robot : The human leads ». Dans : *IEEE Intelligent Systems* (2008).

[75] Kudoh, Shunsuke et al. « Entertainment robot : Learning from observation paradigm for humanoid robot dancing ». Dans : *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robots Syst. Workshop : Art Robots*. T. 7. 2008.

[76] Laban, Rudolf. « Schrifttanz : Methodik, Orthographie, Eriauterungen ». Dans : *Vienna : Universal Edition* (1928).

[77] Laban, Rudolf, Ullmann, Lisa. « The mastery of movement. » Dans : (1971).

[78] LaViers, Amy, Teague, Lori, Egerstedt, Magnus. « Style-based robotic motion in contemporary dance performance ». Dans : *Controls and Art : Inquiries at the Intersection of the Subjective and the Objective* (2014), p. 205-229.

[79] Lefèvre, Hugo et al. « Humanoid-human sit-to-stand-to-sit assistance ». Dans : *IEEE Robotics and Automation Letters* (2024).

[80] Li, Wenqi. « Ancient and Modern Changes in Yan Zhenqing's Calligraphy–Taking the Manuscript of Offering to a Nephew as an Example ». Dans : *2023 5th International Conference on Literature, Art and Human Development (ICLAHD 2023)*. Atlantis Press. 2023, p. 522-531.

[81] Liao, Shu-Hsien. « Expert system methodologies and applications—a decade review from 1995 to 2004 ». Dans : *Expert systems with applications* 28.1 (2005), p. 93-103.

[82] Lugaresi, Camillo et al. « Mediapipe : A framework for building perception pipelines ». Dans : *arXiv preprint arXiv :1906.08172* (2019).

[83] Mansard, Nicolas et al. « A versatile generalized inverted kinematics implementation for collaborative working humanoid robots : The stack of tasks ». Dans : *2009 International conference on advanced robotics*. IEEE. 2009, p. 1-6.

[84] Marder, Eve, Bucher, Dirk. « Central pattern generators and the control of rhythmic movements ». Dans : *Current biology* 11.23 (2001), R986-R996.

[85] Nakaoka, Shin'ichiro. « Choreonoid : Extensible virtual robot environment built on an integrated GUI framework ». Dans : *2012 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII)*. IEEE. 2012, p. 79-85.

[86] Nakaoka, Shin'ichiro et al. « Learning from observation paradigm : Leg task models for enabling a biped humanoid robot to imitate human dances ». Dans : *The International Journal of Robotics Research* 26.8 (2007), p. 829-844.

[87] Neusüss, Floris. « Interview with Floris Neusüss ». Dans : *The Daily Telegraph* (oct. 2010). Published in conjunction with the exhibition *Shadow Catchers : Camera-less Photography* at the Victoria and Albert Museum. URL : https://www.telegraph.co.uk/culture/photography/8051406/Floris-Neususs-Interview.html.

[88] Nie, Buqing, Gao, Yue. « DanceHAT : Generate Stable Dances for Humanoid Robots with Adversarial Training ». Dans : *2022 International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. IEEE. 2022, p. 8511-8517.

[89] Paxton, Steve. « Contact improvisation ». Dans : *The Drama Review* 19.1 (1975), p. 40-42.

[90] Peng, Hua et al. « Robotic dance in social robotics—a taxonomy ». Dans : *IEEE Transactions on Human-Machine Systems* 45.3 (2015), p. 281-293.

[91] Qin, Ruilin et al. « A music-driven dance system of humanoid robots ». Dans : *International Journal of Humanoid Robotics* 15.05 (2018), p. 1850023.

[92] Quigley, Morgan et al. « ROS : an open-source Robot Operating System ». Dans : *ICRA workshop on open source software*. T. 3. 3.2. Kobe. 2009, p. 5.

[93] Ramos, O et al. « Dynamic whole body motion generation for the dance of a humanoid robot ». Dans : *IEEE Robotics & Automation Magazine (RAM)* (2015), p. 1.

[94] Ramos, Oscar E et al. « Dancing humanoid robots : Systematic use of osid to compute dynamically consistent movements following a motion capture pattern ». Dans : *IEEE Robotics & Automation Magazine* 22.4 (2015), p. 16-26.

[95] Roetenberg, Daniel, Luinge, Henk, Slycke, Per et al. « Xsens MVN : Full 6DOF human motion tracking using miniature inertial sensors ». Dans : *Xsens Motion Technologies BV, Tech. Rep* 1.2009 (2009), p. 1-7.

[96] Selvaggio, Mario et al. « Autonomy in physical human-robot interaction : A brief survey ». Dans : *IEEE Robotics and Automation Letters* 6.4 (2021), p. 7989-7996.

[97] Seo, Ju-Hwan et al. « Autonomous humanoid robot dance generation system based on real-time music input ». Dans : *2013 IEEE RO-MAN*. IEEE. 2013, p. 204-209.

[98] Servos, Norbert. « Pina Bausch : dance and emancipation ». Dans : *The Routledge Dance Studies Reader (London and New York : Routledge)* (1998), p. 36-45.

[99] Singh, Rohan P, Gergondet, Pierre, Kanehiro, Fumio. « mc-mujoco : Simulating articulated robots with fsm controllers in mujoco ». Dans : *2023 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII)*. IEEE. 2023, p. 1-5.

[100] Sommer, Sally R. « Loie Fuller ». Dans : *The Drama Review* 19.1 (1975), p. 53-67.

[101] Stubbs, Kristen, Hinds, Pamela J, Wettergreen, David. « Autonomy and common ground in human-robot interaction : A field study ». Dans : *IEEE Intelligent Systems* 22.2 (2007), p. 42-50.

[102] Surgical, Intuitive. « da Vinci. Surgical System ». Dans : *http ://www. intusurg. com/html/davinci. html* (2013).

[103] Thelen, Esther. « Motor development : A new synthesis. » Dans : *American psychologist* 50.2 (1995), p. 79.

[104] Thörn, Oscar, Knudsen, Peter, Saffiotti, Alessandro. « Human-robot artistic co-creation : a study in improvised robot dance ». Dans : *2020 29th IEEE International conference on robot and human interactive communication (RO-MAN)*. IEEE. 2020, p. 845-850.

[105] Todorov, Emanuel, Erez, Tom, Tassa, Yuval. « Mujoco : A physics engine for model-based control ». Dans : *2012 IEEE/RSJ international conference on intelligent robots and systems*. IEEE. 2012, p. 5026-5033.

[106] Tseng, Jonathan, Castellon, Rodrigo, Liu, Karen. « Edge : Editable dance generation from music ». Dans : *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. 2023, p. 448-458.

[107] Tsuchida, Shuhei et al. « AIST Dance Video Database : Multi-genre, Multi-dancer, and Multi-camera Database for Dance Information Processing ». Dans : *Proceedings of the 20th International Society for Music Information Retrieval Conference, ISMIR 2019*. Delft, Netherlands, nov. 2019, p. 501-510.

[108] Varela, Francisco J, Regnot, Franz. « Quel savoir pour l'éthique ? : action, sagesse et cognition ». Dans : (1996).

[109] Winter, David A. « Human balance and posture control during standing and walking ». Dans : *Gait & posture* 3.4 (1995), p. 193-214.

[110] Wolpert, Daniel M, Kawato, Mitsuo. « Multiple paired forward and inverse models for motor control ». Dans : *Neural networks* 11.7-8 (1998), p. 1317-1329.

[111] Xie, Baijun, Park, Chung Hyuk. « Dance with a robot : Encoder-decoder neural network for music-dance learning ». Dans : *Companion of the 2020 ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction*. 2020, p. 526-528.

[112] Xu, Hongyi et al. « Ghum & ghuml : Generative 3d human shape and articulated pose models ». Dans : *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. 2020, p. 6184-6193.

[113] Zhang, Zhengyou. « Microsoft kinect sensor and its effect ». Dans : *IEEE multimedia* 19.2 (2012), p. 4-10.

[114] Zhou, Yi et al. « On the continuity of rotation representations in neural networks ». Dans : *Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition*. 2019, p. 5745-5753.

# Annexes

# Conferences Internationales

Cette thèse s'inscrit dans un projet à la croisée de la création, de la technologie et de l'expression corporelle : elle est le reflet d'un parcours où la danseuse, la chercheuse et l'ingénieuse se confondent. Lorsque nous évoquons l'émergence du geste avec E.V.E. (Partie II) ou la co-création avec le robot humanoide - HRP-4 (Partie III), c'est avant tout notre propre corps qui constitue le laboratoire premier. Ma pratique quotidienne d'une expression corporelle contemporaine, nourrie par la calligraphie et la méditation chinoise, me permet d'aborder chaque expérimentation comme un processus corporel. Les insights que j'ai pu glaner lors de mes performances au Centre des Arts(CDA) d'Enghien-les-Bains sont autant de retours d'expérience qui ont nourri mes choix techniques (l'architecture du GD-HRIF) et artistiques (choix interaction improvisée).

En même temps, mes années d'ingénieur m'ont permis d'acquérir une solide compétence que j'ai pu mettre à profit pour coder des algorithmes de reconnaissance visuelle, concevoir d'une système interactif autonome inspirées du reinforcement learning, et développer des framework intuitifs pour que d'autres artistes puissent s'approprier ces outils. C'est donc une posture à la fois de danseuse-chercheuse et d'ingénieur-praticienne qui sous-tend l'ensemble de ce travail.

À l'issue de cette thèse, nous avons présenté nos travaux lors de plusieurs événements académiques internationaux :

— 2023 28ème International Symposium of Electronic Art (ISEA) [Présentation orale]

— 2024 1er Laval Virtual Doctoriale Consortium [Poster]

— 2024 29ème International Symposium of Electronic Art (ISEA) [Présentation en ligne]

— 2024 33ème IEEE International Conference on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN) [Présentation orale]

— 2024 17ème International Workshop on Human-Friendly Robotics (HFR) [Présentation orale]

Les résultats artistiques ont également été partagés avec le public à travers des performances et des expositions :

— 2022 Performance dansée au Centre des Arts Enghien-les-Bains, Enghien-les-Bains, France.

— 2023 Performance dansée, programme officiel lors du l'ouverture de saison CDA 23-24, au Centre des Arts Enghien-les-Bains, Enghien-les-Bains, France.

— 2024 Installations interactives à Bains Numériques, biennale internationale des arts numériques, à l'Auditorium des Thermes, Enghien-les-Bains, France.

Ces présentations ont permis de confronter la proposition à des retours multiples : chorégraphes, ingénieurs, spectateurs curieux. Nous y avons récolté des enseignements précieux, qui seront détaillés plus loin, tant sur la dimension artistique que sur l'ingénierie.

# Listes de figures

# Table des figures


I.1.1 La « Danse serpentine » de Loïe Fuller. © Centre Pompidou. . . . 28

I.1.2 Extensions de bras en utilisait des tiges en bambou. © https://shorturl.at/pOwPz . . . 29

I.1.3 *Café Müller* © Pina Bausch Foundation(Ulli Weiss) . . . 32

I.1.4 *Nelken*, créé le 30 décembre 1982 à Wuppertal. © Opéra de Lille(Olivier Look) . . . 33

I.1.5 La Plume (1988), Edmond Couchot, Michel Bret et MarieHélène Tramus. . . . 36

I.1.6 Le(s) Pissenlit(s) (1990-2005), Edmond Couchot. . . . 37

I.1.7 La Funambule Virtuelle (2000-2006), Michel Bret et Marie−Hélène Tramus . . . 38

I.1.8 Pilobolus Virtuel (2020), Michel Bret et Marie−Hélène Tramus . . . 39

I.1.9 C puissance C (2008), Chu-Yin CHEN . . . 40

I.1.10 InterACTE(2015), Jégo Jean−François, Guez Judith, Batras Dimitrios et Marie−Hélène Tramus . . . 42

I.1.11 EVE – Dance Is an Unplaceable Place. © https://www.youtube.com/watch?v=CNGUFis6dkE . . . 43

I.1.12 DISCORDANCE (Unwired Dance Theatre, 2022–2023). © https://www.unwireddancetheatre.com/discordance-live-mocap-and-vr . . . 43

I.2.1 Le robot humanoïde HRP-4. © https://robotsguide.com/robots/hrp4 . . . 48

I.2.2 Le Stanford Arm (1969) et le PUMA (1978). . . . 50

I.2.3 Elektro de Westinghouse (1937). © https://themansfieldmuseum.org/elektro/ . . . . . 51
I.2.4 WABOT-1 de l'Université Waseda (1973). © https://www.humanoid.waseda.ac.jp/booklet/kato_2.html . . . . . 52
I.2.5 les robots humanoïdes de taille humaine dans les années 2000-2010 53
I.2.6 Nao de Aldebaran Robotics (2008). © https://us.softbankrobotics.com/nao . . . . . 54
I.2.7 les robots humanoïdes de taille humaine de 2010 jusqu'à présent . 56
I.2.8 Expo universelle de Shanghai (2010), vingt robots NAO exécutèrent une chorégraphie. . . . . 57
I.2.9 CYSP-1 de Nicolas Schöffer. © https://cyberneticzoo.com/cyberneticanimals/1956-cysp-1-nicolas-schoffer-hungarianfrench/ . . . . . 59
I.2.10 Une chorégraphie du robot HRP-2 et le danseur Tayeb Benamara. © Frédéric Maligne . . . . . 60
I.2.11 HUANG Yi & KUKA se produisent lors de TED2017. © Bret Hartman / TED . . . . . 61

II.1.1 Floris Neus˘ss, Nudogram Kassel, 1969, Vintage Photogram . . . . 81
II.1.2 Maison secrète, sans nom. © https://www.youtube.com/watch?v=Q1kcDklvIUQ . . . . . 82
II.1.3 Maison secrète, sans nom. © https://www.youtube.com/watch?v=Q1kcDklvIUQ . . . . . 83
II.1.4 Je penche en avant et j'ai porté mon regard vers mes orteils. . . . . 84
II.1.5 Une inscription calligraphiée de 3,25 mètres de haut. . . . . 84
II.1.6 Transformation de l'inscription calligraphique en interaction entre gestes corporels et espace, basée sur le *Qi* . . . . . 87
II.1.7 Conversation entre gestes corporels et Bouddha environnant, basée sur l'idée du Bois. © Daniel Chen. . . . . 89

II.1.8 Couverture du programme de la « Journée d'étude, Arborer l'archive vivante au musée par le geste artistique : enjeux écologiques », 2020 et 2021 . . . . . 91

II.2.1 E.V.E. est projeté sur le grand mur. . . . . 95
II.2.2 Images du système E.V.E. . . . . 97
II.2.3 Le danseur concrétise son imagination d'E.V.E. en la représentant graphiquement. . . . . 98
II.2.4 Trois principes pour étendre les gestes corporels. . . . . 102
II.2.5 Trois environnements scénographiques de MYTHE D'IMMORTA. 107
II.2.6 Contraste entre les phases hivernale et printanière : la lenteur des réactions des agents en hiver incite la danseuse à ralentir (à gauche, (a)), tandis qu'au printemps, une réactivité accrue favorise des échanges plus rapides et une dynamique de co-construction plus riche (à droite, (b)). . . . . 109

III.2.1 Le diagramme de mc_rtc. © URL: https://jrl.cnrs.fr/mc_rtc/tutorials/introduction/installation-guide.html . . . . . 145
III.2.2 Le GUI de mc_rtc. © URL :https://jrl.cnrs.fr/mc_rtc/tutorials/tools/mc_surfaces_visualization.html . . . . . 149
III.2.3 Le mc_rtc reçoit également des données provenant de capteurs du robot. © URL :https://jrl.cnrs.fr/mc_rtc/tutorials/samples/list-of-samples.html . . . . . 150
III.2.4 *Gesture Dancing Humanoid Robot Interactive Framework (GD-HRIF).* . 152
III.2.5 La caméra ZED 2 installé sur le robot HRP-4. . . . . 154
III.2.6 La pose corporelle 3D complète est estimée par BlazePose. © URL :https://research.google/blog/on-device-real-time-body-pose-tracking-with-mediapipe-blazepose/ . . . . . 155
III.2.7 Les six positions de pose corporelle 3D sélectionnées de la danseuse. 155
III.2.8 La classification à neuf classes. . . . . 157

III.2.9 La séquence de mouvement du robot est conçue selon le processus de création chorégraphique du chorégraphe. Elle est représentée séquentiellement de gauche à droite et de haut en bas, illustrant respectivement $T_1$ à $T_9$. . . . . 158
III.2.10 L'installation de GD-HRIF a eu lieu à l'accueil de CDA lors de l'ouverture de la saison 2023-2024. . . . . 160
III.2.11 La démonstration intégrant GD-HRIF lors d'une performance. . . 161

III.3.1 Le contrôleur de tâches de posture. . . . . 167
III.3.2 *Finite State Machine (FSM)* . . . . . 168
III.3.3 Nous avons appliqué un contrôleur de stabilisation dans notre performance robotique dansée. On peut voir que le robot fait des pas sans tomber. . . . . 170
III.3.4 Les mouvements du HRP-4 issus de la capture de mouvement. . . 173
III.3.5 Remappage des mouvements humains sur le corps robotique. . . . 177
III.3.6 Le processus complet de co-création de la performance robotique dansée. la bordure épaisse représente le cadre proposé : une approche non-portable(*non-wearable*) pour un système interactif basé sur les gestes. Le symbole  en exposant renvoie aux modèles intégrés issus de travaux antérieurs, et la ligne pointillée indique les informations conçues par les artistes. . . . . 178
III.3.7 Conceptualisation de différentes movements artistiques pour le HRP-4. . . . . 181
III.3.8 La nature anthropomorphique du HRP-4, mesurant 158 cm. . . . . 182
III.3.9 *Git* permet à plusieurs contributeurs de travailler simultanément. . 184
III.3.10 Une séquence de mouvements du HRP-4 avec l'intégration du stabilisateur LIPM, où nous pouvons voir ses jambes alterner de gauche à droite pendant l'exécution des mouvements. . . . . 185
III.3.11 une séquence de mouvements de HRP-4 qui imitait les mouvements de regarder en haut et en bas . . . . . 186

III.3.12 mouvements du HRP-4 générés par Xsens-MVN. . . . . 187
III.3.13 une séquences de danse en duo entre la danseuse et HRP-4. . . . . 188
III.3.14 Diagramme complet de *FSM* de notre performance robotique dansée. Diagramme généré © Arnaud Tanguy. . . . . 189
III.3.15 Le HRP-4 tombe en arrière au milieu de la répétition . . . . . 193
III.3.16 Démontre un dialogue de co-création entre un robot humanoïde HRP-4, une danseuse et un système de vie artificielle, favorisant un dialogue interdisciplinaire évolutif. . . . . 194
III.3.17 Une scène de quatre murs blancs conçue par une metteuse en scène. 195
III.3.18 Quatre étapes distinctes ont contribué à la narration de l'interaction trans-temporelle avec les entités artificielles en évolution : le robot humanoïde HRP-4. . . . . 197

III.4.1 The structure of integrating AI-generated movements into the robot's control framework . . . . . 210
III.4.2 Une danseuse improvisée aux côtés du HRP-4. . . . . 213