



**HAL**  
open science

# Prise en compte de la variabilité de morphologie de l'opérateur dans des tâches de montage simulées en réalité virtuelle

Jacques Zhong

► **To cite this version:**

Jacques Zhong. Prise en compte de la variabilité de morphologie de l'opérateur dans des tâches de montage simulées en réalité virtuelle. Informatique [cs]. Université de Lorraine, 2024. Français. NNT : 2024LORR0080 . tel-04746378

**HAL Id: tel-04746378**

**<https://hal.univ-lorraine.fr/tel-04746378v1>**

Submitted on 21 Oct 2024

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

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



**UNIVERSITÉ  
DE LORRAINE**

**BIBLIOTHÈQUES  
UNIVERSITAIRES**

## AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact bibliothèque : [ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr](mailto:ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr)  
*(Cette adresse ne permet pas de contacter les auteurs)*

## LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

[http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg\\_droi.php](http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php)

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>

# Prise en compte de la variabilité de morphologie de l'opérateur dans des tâches de montage simulées en réalité virtuelle

## THÈSE

présentée et soutenue publiquement le 25 juin 2024

pour l'obtention du

**Doctorat de l'Université de Lorraine**  
(mention informatique)

par

Jacques ZHONG

### Composition du jury

<i>Président :</i>	Xuguang WANG	Université Gustave Eiffel
<i>Rapporteur :</i>	Philippe SOUÈRES	CNRS
<i>Examineur :</i>	Christine CHEVALLEREAU	CNRS
<i>Directeurs de thèse :</i>	Francis COLAS	INRIA
	Pauline MAURICE	CNRS
	Vincent WEISTROFFER	CEA-LIST

Mis en page avec la classe thesul.

## Remerciements

J'écris ces quelques derniers mots - certes, au début du manuscrit - pour mettre un point final à cette aventure unique que fut ma thèse. Ces mots ne sont pas évidents à trouver, car ces années de doctorat se sont écoulées à une vitesse fulgurante, avec ses hauts et ses bas, avec son lot de frustration, mais aussi tous les moments de réussite salvateurs. Comme pour beaucoup de projets de thèse, tout a commencé avec un projet très ambitieux, pour aboutir en toute apparence à un volumineux bloc de pages contenant toutes sortes de symboles plus ou moins compréhensibles. Comme pour beaucoup de projets dans la vie, l'important se trouvait dans la multitude d'expériences enrichissantes, et que je vais d'ailleurs éviter de raconter ici, pour ne pas avoir à écrire un second manuscrit. L'important donc est que je sors grandi de cette aventure, et ce grâce à toutes les personnes que j'ai pu rencontrer sur mon chemin, qui ont pu m'inspirer et me guider à travers les vents et les tempêtes.

Mes remerciements vont en premier lieu à mes encadrants de thèse, Francis Colas, Pauline Maurice, Vincent Weistroffer et Claude Andriot, qui m'ont accompagné tout au long de du projet. Ce fut un honneur, mais aussi une chance formidable d'avoir eu une équipe de supervision aussi complémentaire, avec laquelle il était fluide et agréable de travailler. Malgré leurs emplois du temps plus que chargés, ils ont toujours su trouver du temps pour lever des zones d'ombres quel que soit le sujet. Je retiens les points méthodologiques imagés de Francis ; les explications scientifiques plus qu'exhaustives de Pauline ; l'efficacité de Vincent et sa capacité à me débloquent de n'importe quel problème technique ; les idées audacieuses de Claude. Un grand merci donc pour leur sens de la pédagogie et pour m'avoir transmis avec autant de patience leur passion pour la recherche. Un grand merci aussi pour leur confiance, pour m'avoir laissé mener ma barque dans ce vaste océan qu'est le monde de la recherche.

Je voudrais ensuite exprimer toute ma reconnaissance envers les membres de mon jury de soutenance, Xuguang Wang, Philippe Souères et Christine Chevallereau. Merci à eux pour avoir accepté d'évaluer mes travaux et de l'avoir fait avec autant d'intérêt et de minutie. Leurs commentaires et leurs questionnements pertinents m'ont amené à défendre jusqu'au bout mes idées afin de débloquent le succès intitulé Docteur. Je voudrais aussi remercier les membres de mon comité de suivi, en particulier Alain Dutech pour ses mots encourageants et sa bienveillance. Enfin, je n'oublie pas les professeurs qui m'ont initié à la recherche et qui m'ont recommandé de poursuivre dans cette voie, en particulier Frédéric Plumet, Waël Bachta et Sébastien Dignoire ; sans eux, tout cela n'aurait été qu'un rêve lointain.

Durant mon doctorat, j'ai eu l'opportunité de travailler dans deux laboratoires, différents dans leur fonctionnement, mais dans lesquels j'ai pu côtoyer de manière similaire des personnes passionnées et qui m'auront continuellement inspirées durant ma thèse.

Tout d'abord, je salue toute l'équipe du Laboratoire de Simulation Interactive (LSI) du CEA-LIST, dans laquelle j'ai pu faire mes premiers pas en tant que jeune chercheur. Malgré la période compliquée liée à la pandémie, tout a été fait pour que je débute mes recherches dans les meilleures conditions et j'en suis véritablement reconnaissant. En particulier, merci à François Keith pour ses coups de baguette magique faisant disparaître les erreurs de programmation. Merci à Xavier, Anders, Jérémy et Gilles pour leurs retours qui m'auront aidé à prendre du recul sur mon travail. Merci à Vincent, Thibaut et Sébastien pour m'avoir accueilli dans le bureau des doctorants et pour leurs conseils avisés. Merci à Clément, Anoop et toutes les personnes que je n'ai malheureusement pas eues le temps de connaître assez, pour tous les moments d'échange et de camaraderie. Enfin, je remercie Annick et Valérie pour leur précieuse assistance et bien sûr les chefs Alexandre et Martin pour leur optimisme contagieux et pour leur soutien dans les diverses missions que j'ai pu effectuer.

Je salue ensuite tous les membres de l'équipe Larsen et de l'INRIA-LORIA que j'ai pu côtoyer durant mon séjour à Nancy. Ce voyage dans les contrées du Grand-Est m'aura beaucoup apporté tant sur le plan professionnel que personnel. Tout d'abord, je voudrais remercier Jean-Baptiste Mouret pour m'avoir initié à son champ de recherche et pour ses conseils avisés. Merci aux chercheurs permanents de l'équipe pour leur sympathie et pour les discussions qui m'ont aidé à mieux comprendre le milieu académique. Merci à tous les ingénieurs et les doctorants de l'équipe, pour cette ambiance de travail stimulante et bon enfant, pour tous les coups de main et les points unitaires, pour les débats animés et les midis ludiques, bref pour tous les moments partagés ensemble. Une pensée donc, pour ceux qui sont déjà partis vers d'autres aventures : Lucien, Yassine, Vladislav, Nicolas, Yoann, Timothée, ... ; et aussi pour tous ceux que je laisse derrière moi et à qui je souhaite le meilleur pour la suite : les Cats and Foxes, Nima, Quentin, Jessica, Raphaël L., Raphaël B., Aya, Alexandre, Salomé, Alexis, Thomas, Dionis, ... Bien sûr, merci à Véronique et le personnel du laboratoire pour leur aide sur les démarches administratives.

Je tiens enfin à remercier toute ma famille et mes amis, dont le soutien et les encouragements ont été essentiels pour maintenir le cap tout au long de ce marathon intellectuel. Je ne saurais assez remercier mes parents et ma sœur, qui m'ont toujours poussé à donner le meilleur de moi-même, et pour toute l'attention portée à me mettre dans les meilleures conditions possibles pour avancer. D'ailleurs, nombreux sont ceux qui m'ont posé la question : "alors, ça fait quoi d'être docteur ?". Beaucoup de fierté devant le travail accompli, mais aussi un grand soulagement après une dernière ligne droite au rythme soutenu, et un peu plus de temps pour prendre soin de soi, à défaut de pouvoir soigner d'autres personnes.

Pour terminer, je voudrais dédier ce manuscrit à mon père, qui malheureusement nous aura quitté trop tôt. Il aura été un de mes plus solides soutiens durant les épreuves du doctorat, et je suis sûr qu'il aurait été très fier du chemin que j'ai parcouru.

# Table des matières

Table des figures vii

Liste des tableaux ix

<b>Chapitre 1</b>	
<b>Introduction</b>	<b>3</b>

1.1	Contexte scientifique . . . . .	3
1.1.1	Troubles musculo-squelettiques et outils de prévention . . . . .	3
1.1.2	Morphologie et risque ergonomique . . . . .	4
1.2	Problématiques de thèse . . . . .	5
1.3	Plan du manuscrit . . . . .	6
1.4	Diffusion scientifique . . . . .	6

<b>Chapitre 2</b>	
<b>Approches d'évaluation de l'ergonomie</b>	<b>9</b>

2.1	Ergonomie de poste de travail . . . . .	10
2.1.1	Types d'ergonomie . . . . .	10
2.1.2	Principaux facteurs de risque physiques . . . . .	11
2.1.3	Facteurs de risque liés à la morphologie . . . . .	12
2.2	Standards d'évaluation en ergonomie . . . . .	16
2.2.1	Questionnaires . . . . .	16
2.2.2	Normes et recommandations . . . . .	17
2.2.3	Métriques d'évaluation . . . . .	18
2.3	Outils de simulation . . . . .	21
2.3.1	Simulations d'humains virtuels . . . . .	21
2.3.2	Modèles d'humain virtuels . . . . .	23
2.3.3	Animation d'humains virtuels . . . . .	27
2.4	Conclusion . . . . .	33

<b>Chapitre 3</b>	
<b>Simulation physique et interactive d’humains virtuels</b>	<b>35</b>
3.1 Introduction . . . . .	35
3.2 Simulateur d’humains virtuels . . . . .	36
3.2.1 Plateforme de simulation XDE . . . . .	36
3.2.2 Humain virtuel XDE . . . . .	38
3.3 Contrôle corps-complet . . . . .	39
3.3.1 Formulation du problème QP . . . . .	40
3.3.2 Tâches QP . . . . .	41
3.3.3 Contraintes QP . . . . .	43
3.4 Interfaçage entre physique et contrôle . . . . .	46
3.4.1 Fonctionnement général . . . . .	46
3.4.2 Architecture du composant <code>xde::control::tsid</code> . . . . .	47
3.5 Conclusion . . . . .	49
<b>Chapitre 4</b>	
<b>Mise en posture en réalité virtuelle</b>	<b>51</b>
4.1 Introduction . . . . .	51
4.2 Mannequin physique et interactif . . . . .	53
4.2.1 Contrôle corps-complet . . . . .	53
4.2.2 Interactions en réalité virtuelle . . . . .	57
4.3 Cas d’usage . . . . .	60
4.3.1 Description du cas d’usage . . . . .	60
4.3.2 Evaluation ergonomique . . . . .	62
4.3.3 Discussions . . . . .	65
4.4 Conclusion . . . . .	66
4.4.1 Synthèse . . . . .	66
4.4.2 Perspectives . . . . .	67
<b>Chapitre 5</b>	
<b>Adéquation d’un poste de travail à une large population</b>	<b>69</b>
5.1 Introduction . . . . .	69
5.2 Génération de comportements adaptés à la morphologie . . . . .	70
5.2.1 Formalisation du problème . . . . .	71
5.2.2 Simulation dynamique d’activités . . . . .	72
5.2.3 Adaptation des comportements . . . . .	73
5.3 Cas d’usage : activité de vissage . . . . .	77



5.3.1	Description de l'activité . . . . .	78
5.3.2	Application de MTME au cas d'usage . . . . .	79
5.3.3	Expériences et setup de simulation . . . . .	84
5.4	Adéquation à l'activité de vissage et analyse comportementale . . . . .	85
5.4.1	Cartes d'adéquation . . . . .	85
5.4.2	Comportements élités . . . . .	88
5.4.3	Stratégies motrices . . . . .	99
5.4.4	Synthèse . . . . .	101
5.5	Evaluation des performances de l'approche . . . . .	101
5.5.1	Vitesse de convergence . . . . .	102
5.5.2	Optimalité des solutions . . . . .	105
5.6	Conclusion . . . . .	109

## Chapitre 6

### Conclusion générale 111

6.1	Synthèse des travaux . . . . .	111
6.2	Perspectives . . . . .	112
6.2.1	Validation expérimentale . . . . .	112
6.2.2	Amélioration des comportements . . . . .	113
6.2.3	Optimisation du poste de travail . . . . .	114
6.2.4	Variabilité intra-morphologique . . . . .	114

## Bibliographie

## Annexe 126

### Annexe A

#### Limites en couples articulaires dans la littérature

A.1	Population moyenne . . . . .	127
A.2	Populations obèses et non-obèses . . . . .	128



# Table des figures

2.1	Questionnaire Nordique . . . . .	17
2.2	Fiche d'évaluation RULA . . . . .	19
2.3	Logiciels de simulation d'humains virtuels . . . . .	21
2.4	Types de modèle d'humain virtuel . . . . .	23
2.5	Population d'humains, base de données anthropométriques NHANES . . . . .	26
3.1	Vue d'ensemble de la simulation physique d'humains virtuels . . . . .	36
3.2	Exemples de postes de travail avec XDE . . . . .	38
3.3	Humain virtuel XDE . . . . .	39
3.4	Cône de friction linéarisé . . . . .	45
3.5	Vue détaillée de la simulation d'humains virtuels implémentée . . . . .	46
3.6	Schéma d'ensemble du composant <code>xde::control::tsid</code> . . . . .	48
4.1	Fonctionnement global de l'outil de mise en posture . . . . .	54
4.2	Humain virtuel et configuration du contrôleur corps-complet . . . . .	55
4.3	Mannequin virtuel et mise en posture en réalité virtuelle . . . . .	57
4.4	Phases du brisage d'un contact pied et sol . . . . .	59
4.5	Vue de côté du poste de travail virtuel . . . . .	61
4.6	Posture pour toutes les combinaisons de morphologie et de hauteur de cible . . . . .	64
4.7	Valeur de l'indicateur en couples en fonction de la morphologie, de la hauteur de cible et du groupe articulaire . . . . .	64
5.1	Architecture pour étudier l'adéquation d'un poste de travail à une large population d'humains distincts . . . . .	71
5.2	Configuration du poste de vissage, scénarios A et B . . . . .	78
5.3	Carte d'adéquation et postures pour quelques morphologies, scénario A . . . . .	86
5.4	Carte d'adéquation et postures pour quelques morphologies, scénario B . . . . .	87
5.5	Phases d'activité et trajectoires en couples sur les deux morphologies extrêmes, scénario A . . . . .	88
5.6	Influence de la taille sur différentes trajectoires, scénario A . . . . .	90
5.7	Influence de l'IMC sur différentes trajectoires, scénario A . . . . .	91
5.8	Couples articulaires les plus influencés par la morphologie, scénario A . . . . .	93
5.9	Influence de la taille sur différentes trajectoires, scénario B . . . . .	94
5.10	Couples articulaires les plus influencés par la morphologie, scénario B . . . . .	95
5.11	Influence de l'IMC sur différentes trajectoires, scénario B . . . . .	96
5.12	Angle du dos en fonction de l'IMC, sur l'ensemble des répétitions . . . . .	98
5.13	Couples des lombaires en fonction de la taille, sur l'ensemble des répétitions . . . . .	99
5.14	Variabilité et valeurs des paramètres élites . . . . .	100

*Table des figures*

---

5.15 Métriques pour analyser la convergence de MTME . . . . .	102
5.16 Evolution du taux d'échec par rapport à d'autres méthodes d'optimisation . .	105
5.17 Optimalité des résultats sur quelques morphologies, scénario A . . . . .	107

# Liste des tableaux

4.1	Paramétrage du contrôleur QP pour la mise en posture interactive . . . . .	56
4.2	Variabilité sur la configuration de l'humain virtuel sur l'ensemble des cas . . .	63
5.1	Paramétrage du contrôleur QP et intervalles de recherche, pour la génération de comportements morpho-spécifiques . . . . .	80
A.1	Capacités en couples articulaires de l'humain virtuel moyen . . . . .	127
A.2	Données de forces musculaires pour des populations obèse et non obèse . . .	128



## Résumé

Dans l'industrie, les troubles musculo-squelettiques constituent un problème de santé majeur affectant le bien-être et la productivité des travailleurs. Le travail d'un ergonome consiste à identifier les facteurs de risque et à mettre en place des mesures correctives pour améliorer les conditions de travail. Parmi les facteurs de risque, la morphologie d'un individu a un rôle déterminant sur le développement des troubles musculo-squelettiques et doit être prise en compte lors de l'évaluation ergonomique.

Dans ce contexte, l'objectif de la thèse est de développer des outils pour évaluer l'adéquation d'un poste de travail à une grande variété de morphologies de travailleurs. Les outils de simulation d'humains virtuels sont couramment utilisés dans l'industrie pour réduire les coûts de prototypage en détectant au plus tôt les défauts de conception. Ces outils peuvent simuler différentes morphologies d'humains et dresser rapidement une analyse complète et quantitative du risque. Cependant, un outil de simulation doit être suffisamment réaliste dans la modélisation des phénomènes physiques pour que les résultats soient interprétables. De plus, les postures et les mouvements générés doivent être adaptés à l'activité mais aussi à la morphologie de l'humain. Enfin, un tel outil doit être accessible à des utilisateurs non-spécialistes, avec un temps nécessaire minimal pour sa prise en main.

Une approche émergente en ergonomie et utilisée dans ces travaux consiste à simuler l'humain dans une simulation physique à l'aide d'un contrôleur corps-complet issu de la robotique humanoïde. Cette approche permet de générer en temps interactif des mouvements et des efforts dynamiquement cohérents. De plus, l'approche est générique et peut être appliquée à différentes morphologies d'humains et à différents scénarios de postes de travail.

Dans une première contribution, le problème de la mise en posture d'un humain virtuel physique est étudié. En effet, la simulation utilisée impose des contraintes liées à la physique, qui rendent plus difficile la mise en posture de l'humain virtuel. Pour répondre à cela, nous développons une interface en réalité virtuelle, avec l'utilisateur en immersion dans le poste de travail virtuel. Cette approche permet à l'utilisateur d'interagir de manière plus naturelle avec des humains virtuels de morphologies différentes et de visualiser plus facilement les postures et les efforts internes en jeu.

Dans une deuxième contribution, le problème de la génération de comportements spécifiques à la morphologie pour une large population d'humains est étudié. Nous proposons une approche utilisant un algorithme multitâches et boîte noire basé sur l'optimisation qualité-diversité, pour optimiser efficacement le paramétrage des contrôleurs corps-complet pour l'ensemble des individus. Sur un scénario de vissage, notre approche permet de générer des comportements uniques pour chaque morphologie et optimisés en termes de performance et d'ergonomie. En outre, cette approche produit une carte d'adéquation qui permet de voir directement si un poste de travail est adapté ou non à la population ciblée.

Les approches introduites ouvrent de nouvelles pistes à explorer, notamment pour optimiser directement les postes de travail par rapport à la morphologie de l'humain ou pour prendre en compte la diversité de stratégies comportementales pour chaque morphologie.

**Mots-clés:** Ergonomie des postes de travail, Simulation physique, Contrôle corps-complet, Réalité virtuelle, Optimisation multitâches.

## Abstract

In industry, musculoskeletal disorders are a major health issue affecting the well-being and the productivity of workers. An ergonomist aims at identifying risk factors in order to implement corrective measures that improve working conditions. Among those risk factors, the morphology of a worker has a decisive impact on the development of musculoskeletal disorders, and must be taken into account during ergonomic assessment.

In this context, the objective of the thesis is to develop tools to account for the morphology of workers when designing workstation activities. In particular, virtual human simulation tools are commonly used to reduce prototyping costs by detecting design flaws as early as possible. Simulations can model different humans and their behaviors and can quickly provide comprehensive and quantitative risk analysis. However, a simulation tool must model physical phenomenon precisely enough for the results to be interpretable. In particular, the generated postures and movements must be adapted to the activity and the human morphology. Moreover, such a tool needs to be accessible to non-specialist users with minimal learning time.

An emerging approach in ergonomics used in this work consists in simulating humans in a physics simulation using a whole-body controller. This approach is able to generate dynamically-consistent motions and efforts in real-time. Moreover, the approach is generic and can be applied to different human morphologies and workstation scenarios.

In a first contribution, the problem of puppeteering a physics-based virtual human is studied. The simulation enforces physical constraints, making it more difficult to puppeteer the virtual human. To address this issue, we develop a virtual reality interface, with the user immersed in the virtual workstation of the worker. With this approach, the user is able to interact more naturally with virtual humans of different morphologies, and more easily visualize the postures and internal efforts involved.

In a second contribution, the problem of generating morphology-specific behaviors for a large population of humans is studied. We propose an approach utilizing a multi-task black-box algorithm based on quality-diversity optimization, to efficiently optimize the parameterization of whole-body controllers for the studied population. On a screw driving scenario, the approach generates unique behaviors for each morphology, optimized in terms of performance and ergonomics. In addition, the approach produces a suitability map that gives a global visualization of whether or not a workstation is suitable for the target population.

The presented approaches open up new ideas to explore, such as directly optimizing workstations based on the human morphology, or studying morphology-related behavioral variability.

**Keywords:** workstation ergonomics, physics simulation, whole-body control, virtual reality, multi-task optimization.



# Chapitre 1

## Introduction

Dans la société actuelle, les individus passent une part importante de leur temps au travail. Il est donc crucial pour eux de travailler dans de bonnes conditions pour leur bien-être sur le long terme. Avec le progrès technologique, de nombreuses tâches ont pu être automatisées en particulier les tâches physiques. Cependant, le travail manuel reste courant dans de nombreux domaines d'activité et est souvent associé à des douleurs chroniques. Il y a alors une nécessité de développer des méthodes préventives pour améliorer le confort des travailleurs. Pour cela, les outils numériques sont de plus en plus performants pour modéliser des phénomènes réels et pourraient apporter des pistes de solution.

### 1.1 Contexte scientifique

#### 1.1.1 Troubles musculo-squelettiques et outils de prévention

Les troubles musculo-squelettiques (TMS) sont des maladies qui affectent le corps humain, et plus spécifiquement les muscles, les tendons et les nerfs. Il existe de nombreuses pathologies : le syndrome du canal carpien (poignet), l'épicondylite (coude), la lombalgie (bas du dos) ou l'ostéoarthrose figurent parmi les TMS les plus courants (EU-OSHA et al., 2020). Au travail, ces maladies sont liées en général à des mouvements répétés, des postures inadaptées ou des efforts importants. Les symptômes de ces maladies se développent progressivement : des douleurs temporaires durant l'activité peuvent conduire à des douleurs chroniques et potentiellement incapacitantes, sans méthodes de prévention et de traitement médical appropriées.

La prévalence des TMS est élevée dans l'industrie dans le monde entier et n'a cessé d'augmenter ces 30 dernières années, à cause de la croissance rapide et du vieillissement de la population (S. L. JAMES et al., 2018). Certaines activités sont plus à risque, en particulier les activités manuelles impliquant des efforts physiques importants et répétés, mais aussi les postes fixes où l'ouvrier maintient une posture inconfortable sur de longues périodes de temps. Les TMS constituent un problème de santé majeur, amenant dans la plupart des cas à des séquelles à vie et à une réduction significative de la qualité de vie des travailleurs. De plus, ces maladies occasionnent un coût important pour les systèmes de santé : rien qu'en France, le coût direct des TMS a été estimé à environ 2 milliards d'euros pour l'année 2017 (ASSURANCE MALADIE, 2020). Les TMS ont aussi un coût important en termes de productivité. Ils représentent la cause majeure d'arrêt de travail et d'absentéisme dans les

milieux professionnels en France. Les TMS sont aussi responsables d'un présentisme accru, où le travailleur est présent sur son lieu de travail, mais avec une productivité réduite due à la diminution de ses capacités physiques.

Pour contribuer à la réduction des problèmes liés aux TMS, de nombreux outils méthodologiques ont été développés dans le domaine de l'ergonomie. L'approche classique consiste à observer et interroger l'ouvrier durant son activité professionnelle, afin d'estimer le risque de développer des TMS. En se basant sur ces observations, l'ergonome peut proposer des recommandations pour améliorer l'environnement de travail ou la méthode de travail de l'opérateur. Plus récemment, les outils d'assistance mécaniques (exosquelettes, robots collaboratifs) sont des sujets de recherche actifs en ergonomie. Ces dispositifs visent à augmenter les capacités physiques de l'humain pour l'aider sur différentes tâches manuelles et lui permettre de moins se fatiguer durant l'activité. Pour la thèse, l'attention est plutôt portée sur les outils de prévention basés sur la simulation de l'humain. Ces outils de simulation sont communément utilisés dans l'industrie pour prendre en compte les recommandations liées à l'ergonomie dès la phase de conception des postes de travail.

### 1.1.2 Morphologie et risque ergonomique

Dans le domaine de l'ergonomie, les caractéristiques liées à la morphologie d'un individu ont très tôt été identifiées comme des facteurs de risque de TMS (PHEASANT, 1988). Communément, la morphologie définit en biologie la forme et la structure externe d'un être vivant – ici l'humain. Dans le cadre de cette thèse, la morphologie couvre un sens plus large et désigne l'ensemble des caractéristiques physiques d'un individu, c'est-à-dire les caractéristiques anatomiques (p. ex. dimensions corporelles, masses) mais aussi physiologiques (p. ex. capacités musculaires).

La morphologie d'un individu est susceptible d'influencer la manière dont l'activité est effectuée et donc le risque ergonomique lié à cette activité (COLE et al., 2004). Par exemple, deux individus de tailles différentes n'ont pas la même zone de travail idéale : intuitivement, l'individu de plus petite taille serait plus avantageux pour des tâches proches du sol, alors que l'individu de grande taille aurait plus de facilité pour les tâches en hauteur et nécessitant une portée d'atteinte plus importante. Ce type d'analyse ne se limite pas à la taille d'un individu et peut s'étendre à d'autres caractéristiques morphologiques, selon l'activité considérée.

Différentes études épidémiologiques ont étudié l'influence de paramètres morphologiques sur le risque de développer des TMS (BUCKLE et al., 2011 ; FABER et al., 2012). Ces études expérimentales servent de vérité-terrain en ergonomie mais nécessitent des moyens importants. Pour obtenir des résultats significatifs, ces études doivent considérer un échantillon d'individus suffisamment large et représentatif de la population étudiée. De plus, les TMS apparaissent progressivement dans le temps et de manière non déterministe. Des études longitudinales menées sur plusieurs années sont alors nécessaires pour espérer établir un lien entre des facteurs de risque et l'apparition effective de TMS.

Dans un contexte de conception des postes de travail, il n'est pas envisageable d'effectuer de telles études pour tester chaque nouvelle conception. Pour cela, la simulation d'humains virtuels est devenue un outil incontournable pour concevoir des postes de travail ergonomiques (CHAFFIN, 2008). La simulation n'a pas vocation à remplacer les études expérimentales, mais elle se base sur les résultats de ces études pour fournir une analyse précise du risque sur des postes de travail en cours de conception. Les outils de simulation offrent donc un gain de temps important : il n'est pas nécessaire de construire une maquette physique avec des opérateurs réels pour tester chaque proposition.

## 1.2 Problématiques de thèse

Dans cette thèse, l'objectif est de développer de nouveaux outils basés sur la simulation permettant d'améliorer la prise en compte de la morphologie des travailleurs lors de l'évaluation de l'ergonomie. Dans ce contexte, la question générale qui guide le manuscrit de thèse est la suivante :

*Comment évaluer l'adéquation de postes de travail pour une large variété de morphologies ?*

Un avantage important de la simulation est de pouvoir modéliser différentes morphologies d'humains et de simuler leur comportement sur des postes de travail. Pour chaque morphologie, il est possible de calculer rapidement différentes métriques utilisées en ergonomie pour estimer le risque de développer des TMS, tel que RULA (Rapid Upper Limb Assessment) (MCATAMNEY et al., 1993). L'analyse de ces métriques à l'issue de la simulation permet d'identifier des situations à risques et de corriger au plus tôt des défauts de conception.

Cependant, la simulation fait nécessairement des hypothèses simplificatrices par rapport à la réalité, à cause de la complexité des phénomènes réels et du budget computationnel limité. Dans les solutions logicielles existantes (CHAFFIN, 2008), l'humain virtuel est en général animé à l'aide de mouvements pré-enregistrés ou avec des méthodes basées sur la cinématique inverse (ARISTIDOU et al., 2018). Il en résulte que les mouvements générés sur l'humain virtuel sont stéréotypés avec une prise en compte limitée de la morphologie d'une part et des contraintes liées à la physique d'autre part.

Pour répondre à ce problème, une approche émergente en ergonomie consiste à coupler une simulation physique d'humains virtuels avec des méthodes de contrôle corps-complet provenant de la robotique humanoïde (DE MAGISTRIS et al., 2013). Cette approche permet de générer en temps réel des mouvements et des efforts cohérents d'un point de vue dynamique.

Dans une simulation physique, l'humain virtuel doit respecter les contraintes liées aux lois de la dynamique et aux collisions. Ces contraintes physiques peuvent ne pas être respectées dans les simulations cinématiques typiquement utilisées en animation, ce qui facilite la mise en posture des personnages humains. En simulation physique, il existe une difficulté potentielle à effectuer cette mise en posture. Ce mode d'interaction pourrait aider l'ergonome à tester l'influence de différentes postures et morphologies sur le risque ergonomique. Cela amène à la première problématique de la thèse :

### 1.1 Première problématique

Comment faciliter l'animation d'humains virtuels physiques de différentes morphologies ?

Dans les travaux basés sur des humains virtuels physiques, la question de la variabilité morphologique n'a pas fait l'objet d'études approfondies. GOMES et al. (2022) proposent d'optimiser le comportement de plusieurs morphologies en termes d'ergonomie, mais l'étude se limite à quelques morphologies. Dans le cadre de la thèse, nous souhaitons pouvoir effectuer des analyses ergonomiques sur une large population d'individus et de manière automatisée. Optimiser individuellement le comportement de chaque individu peut alors se révéler extrêmement coûteux en temps de calcul. La seconde problématique de la thèse est la suivante :

## 1.2 Deuxième problématique

Comment générer efficacement des comportements adaptés pour une large diversité de morphologies ?

## 1.3 Plan du manuscrit

Pour répondre aux questions énoncées, la thèse s’articule de la manière suivante :

Dans le [chapitre 2](#), nous commençons par présenter l’état de l’art en rapport avec les problématiques de la thèse. Le chapitre fait une revue des méthodes standards utilisées pour l’évaluation de l’ergonomie et des preuves épidémiologiques montrant les liens entre des facteurs morphologiques et l’apparition de TMS. Le chapitre décrit ensuite les principales méthodes de simulation existantes pour modéliser et animer différentes morphologies d’humains virtuels.

Dans le [chapitre 3](#), nous présentons les outils de simulation utilisés dans le cadre de la thèse pour simuler des humains virtuels. Ces outils consistent en une simulation physique et un contrôleur corps-complet basé sur l’optimisation quadratique (QP). Notre implémentation du contrôleur QP dans le simulateur physique est décrite plus en détails.

Dans le [chapitre 4](#), nous proposons une nouvelle approche pour mettre en posture l’humain virtuel physique de manière immersive. Cette approche repose sur une interface en réalité virtuelle et offre plusieurs modes d’interaction pour manipuler directement l’humain virtuel. Nous appliquons la méthode sur une activité où l’utilisateur doit amener l’humain virtuel à pousser sur des cibles, pour trois morphologies distinctes.

Dans le [chapitre 5](#), nous introduisons une approche servant à étudier l’adéquation d’un poste de travail pour une large population d’individus. Un algorithme d’optimisation multi-tâches est utilisé pour optimiser de manière efficace le comportement de chaque individu en termes de performance et d’ergonomie. Nous appliquons notre méthode sur une activité de vissage pour 100 morphologies différentes. Dans les résultats, la carte d’adéquation et l’analyse des comportements générés permettent de déterminer si le poste de travail est adapté à la population et de mieux comprendre l’influence de la morphologie en matière d’ergonomie.

Enfin, le [chapitre 6](#) fait une synthèse des travaux et montre en quoi ces travaux répondent aux problèmes de la thèse. Plusieurs pistes d’améliorations et de recherche sont proposées pour de futurs travaux.

## 1.4 Diffusion scientifique

Les contributions présentées dans la thèse ont fait l’objet de deux publications internationales :

- **Abstract étendu** : J. Zhong, V. Weistroffer, P. Maurice, C. Andriot et F. Colas, *Interacting with a Torque-Controlled Virtual Human in Virtual Reality for Ergonomics Studies*, in 2022 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces Abstracts and Workshops (VRW), p. 678-679, mars 2022.
- **Revue internationale** : J. Zhong, V. Weistroffer, J.-B. Mouret, F. Colas et P. Maurice, *Workstation Suitability Maps : Generating Ergonomic Behaviors on a Population of Virtual Humans With Multi-Task Optimization*, IEEE Robotics and Automation Letters, vol. 8, n°11, p. 7384-7391, nov. 2023.

Les travaux de thèse ont fait l'objet de communications dans les conférences nationales suivantes :

- **Poster** : J. Zhong, P. Maurice, F. Colas et V. Weistroffer, *Prise en compte de la variabilité morphologique de l'opérateur dans des tâches de montage simulées en réalité virtuelle*. Journée des Jeunes Chercheurs en Robotique (JJCR), 2021.
- **Présentation** : J. Zhong, P. Maurice, V. Weistroffer et F. Colas, *A quality-diversity approach to study the impact of human morphology in physics-based virtual workstations*. Journée des Jeunes Chercheurs et Jeunes Chercheuses en Robotique (JJCR), 2022.
- **Poster** : J. Zhong, P. Maurice, V. Weistroffer et F. Colas, *Multi-task optimization to evaluate workstation suitability over a population of virtual humans*. Journées nationales de la Robotique Humanoïde (JNRH), 2023.



# Chapitre 2

## Approches d'évaluation de l'ergonomie

### Sommaire

---

<b>2.1 Ergonomie de poste de travail</b> . . . . .	<b>10</b>
2.1.1 Types d'ergonomie . . . . .	10
2.1.2 Principaux facteurs de risque physiques . . . . .	11
2.1.3 Facteurs de risque liés à la morphologie . . . . .	12
<b>2.2 Standards d'évaluation en ergonomie</b> . . . . .	<b>16</b>
2.2.1 Questionnaires . . . . .	16
2.2.2 Normes et recommandations . . . . .	17
2.2.3 Métriques d'évaluation . . . . .	18
<b>2.3 Outils de simulation</b> . . . . .	<b>21</b>
2.3.1 Simulations d'humains virtuels . . . . .	21
2.3.2 Modèles d'humain virtuels . . . . .	23
2.3.3 Animation d'humains virtuels . . . . .	27
<b>2.4 Conclusion</b> . . . . .	<b>33</b>

---

L'objectif des travaux de thèse est de développer des outils pour évaluer l'influence de la morphologie sur l'ergonomie des postes de travail. Dans le domaine de l'ergonomie, la prise en compte de la morphologie des travailleurs est un thème central avec de nombreux travaux sur les divers aspects du problème. De nombreuses études épidémiologiques ont été menées dans le but d'identifier les caractéristiques morphologiques d'un travailleur pouvant être à l'origine de troubles musculo-squelettiques (TMS). Ces études sont indispensables pour comprendre l'influence réelle de la morphologie en termes de TMS liée à une exposition prolongée à des facteurs de risque.

En se basant sur ces observations expérimentales, différents outils ont été développés, pour estimer le risque de TMS dans différentes situations de travail et fournir des recommandations permettant de réduire ce risque. Parmi ces outils, la simulation est devenue aujourd'hui incontournable pour concevoir des postes de travail ergonomiques. En particulier, les simulations d'humains virtuels permettent de modéliser différentes morphologies de travailleurs avec des comportements simples, pour identifier des défauts de conception pouvant mener au développement de TMS.

Ce chapitre commence par poser le cadre théorique lié à l'ergonomie des postes de travail (section 2.1). Les principaux facteurs de risque en ergonomie physique sont présentés, liés d'une part à l'activité et d'autre part à la morphologie du travailleur. Ensuite, les méthodes classiquement utilisées par les ergonomes pour évaluer le niveau de risque ergonomique sont présentés (section 2.2). Les outils de simulations utilisés en ergonomie sont présentés : ce chapitre décrit les principales approches pour modéliser et animer des humains virtuels de différentes morphologies (section 2.3).

## 2.1 Ergonomie de poste de travail

En tant que discipline scientifique, l'ergonomie a été développée et formalisée principalement à partir des années 1950 dans les pays industrialisés (WILSON, 2000). Au cours du XXème siècle, avec la modernisation des moyens de production et l'organisation scientifique du travail, la productivité dans les usines n'a cessé de croître. La conception de l'ensemble de la chaîne de production se fait en amont avant la mise en production pour réduire au maximum les modifications improvisées et liées à des erreurs de conception. Le travail est entièrement planifié et chaque ouvrier est assigné à quelques tâches spécifiques et répétées durant une journée de travail.

Dans une logique productiviste, le confort des travailleurs peut facilement être négligé, avec des conséquences négatives sur leur santé à long terme et une réduction significative de leur qualité de vie. De nombreuses études montrent la prévalence élevée des maladies du travail et en particulier des TMS dans l'industrie (BEVAN, 2015 ; EU-OSHA et al., 2020). Les TMS occasionnent des coûts importants pour le système de santé et pour les entreprises, liés notamment aux traitements médicaux, aux arrêts de travail et à la perte de productivité (BEVAN, 2015). Le développement de l'ergonomie témoigne donc d'une prise de conscience croissante des risques sur la santé et sur le bien-être des travailleurs, mais aussi de la perte de productivité liée à des conditions de travail inappropriées.

### 2.1.1 Types d'ergonomie

L'ergonomie est une discipline scientifique dont la portée et la définition ont évolué au fil des années (WILSON, 2000). Le mot « ergonomie » a été officiellement utilisé depuis les années 1950 et provient du grec « ergo » (travail) et « nomos » (étude) ce qui signifie littéralement « étude du travail ». En particulier, l'ergonomie s'intéresse à la conception d'un environnement de travail dans lequel l'humain peut travailler de manière efficace et confortable. L'ergonomie est une science appliquée mêlant éléments théoriques et pratiques. Sur l'aspect théorique, la discipline cherche à comprendre les capacités et les limites de l'humain en rapport avec le travail à effectuer. L'ergonomie est aussi largement définie par sa pratique et par l'application de ces éléments théoriques pour développer des méthodes pour identifier les facteurs pouvant porter atteinte à la santé et à la productivité des travailleurs.

L'ergonomie comporte trois domaines d'approche : l'ergonomie physique, cognitive et organisationnelle (IEA, 2021).

- **L'ergonomie physique** s'intéresse directement à l'activité physique effectuée par le travailleur. L'analyse ergonomique s'appuie sur les connaissances du corps humain (en biomécanique, en anthropométrie ...) pour déterminer si son comportement présente des risques de TMS et voir comment le poste de travail peut être mieux dimensionné.



- L'**ergonomie cognitive** s'intéresse aux processus cognitifs durant l'activité pour percevoir, traiter et mémoriser l'information, dans le but de réduire la charge mentale et le stress des ouvriers.
- L'**ergonomie organisationnelle** s'intéresse à l'amélioration du fonctionnement global d'une organisation. Il s'agit d'appliquer des méthodes pour faciliter la communication et le travail d'équipe, mais aussi la gestion des ressources et du temps de travail au sein d'une unité de production.

L'ergonomie est donc un champ multidisciplinaire faisant appel à de nombreuses disciplines telles que la biomécanique, la psychologie, l'ingénierie ou la sociologie.

Pour chacun de ces trois aspects, divers facteurs de risque ont été identifiés à travers des études épidémiologiques et des méthodes ont été établies afin de mesurer le niveau de risque. L'ergonome doit alors s'assurer que le niveau de risque se situe dans les limites acceptables pour l'ouvrier, pour l'ensemble des facteurs de risque liés à l'activité évaluée. Idéalement, les trois aspects doivent être pris en compte dans une approche holistique (WILSON, 2000). Par exemple, une mauvaise organisation du travail ou la présence de troubles dépressifs peuvent affecter les performances physiques des travailleurs.

Pour les travaux de thèse, nous nous limitons au domaine de l'ergonomie physique, étant donné que la morphologie d'un individu a trait aux caractéristiques physiques de l'individu. De plus, l'apparition des TMS est essentiellement liée à des facteurs de risque physiques, dont les principaux sont donnés ci-après.

### 2.1.2 Principaux facteurs de risque physiques

En ergonomie physique, l'ergonome observe les postures et les mouvements du travailleur pour identifier l'ensemble des facteurs pouvant mener au développement de TMS. Ces facteurs sont souvent spécifiques aux tâches effectuées et aux objets manipulés durant l'activité (WIEHAGEN et al., 2004). Cependant, ces facteurs de risque peuvent se réduire en quelques facteurs principaux communément acceptés dans la communauté (JAFFAR et al., 2011) :

- **les postures extrêmes** pour le travailleur avec des positions articulaires éloignées des postures recommandées en ergonomie (p. ex. posture de score minimal dans RULA). Typiquement, les postures à éviter sont celles où le travailleur a le bras levé, le dos penché ou la main tordue sur une période prolongée.
- **les répétitions excessives** d'un mouvement ou d'une suite de mouvements identiques, avec un temps de repos insuffisant entre les répétitions. Cela entraîne une accumulation de la fatigue sur certains groupes musculaires, ce qui peut mener à des lésions musculaires sur le long terme.
- **des forces exercées élevées** durant l'activité, typiquement lorsque des charges lourdes sont manipulées par l'ouvrier. Un effort prolongé et de valeur trop élevée par rapport aux capacités musculaires du travailleur favorise l'apparition de TMS.
- **les vibrations** liées principalement à l'utilisation d'outils manuels (ponceuse, perceuse, burineur, etc.). L'exposition prolongée à des vibrations mécaniques est associée à l'apparition de divers troubles articulaires et neurologiques (arthrose, syndrome du canal carpien, etc.) sur les membres supérieurs.

L'apparition de TMS provient d'une exposition accumulée dans le temps à un ou plusieurs facteurs de risque (JAFFAR et al., 2011). En général, les symptômes se développent graduellement et ne résultent pas d'un évènement unique, ce qui rend plus difficile les études

épidémiologiques visant à identifier les relations de cause à effet entre facteurs de risque et TMS. Souvent, plusieurs facteurs de risque ergonomique sont présents simultanément durant l'activité et à des niveaux d'intensité variables. Pour de nombreux TMS, la présence d'une combinaison de facteurs de risque exprimés avec une intensité élevée augmente fortement le risque d'apparition et d'aggravation des symptômes existants. Il n'est cependant pas possible d'exprimer précisément (c.-à-d. avec un modèle mathématique) l'augmentation relative du risque liée à de multiples facteurs.

### 2.1.3 Facteurs de risque liés à la morphologie

En ergonomie physique, la morphologie de l'individu (c.-à-d. ses caractéristiques physiques) est un facteur de risque connu parmi ceux liés à l'individu (COLE et al., 2004). En particulier, le risque de TMS est présent dès qu'il existe un écart entre les capacités physiques du travailleur et les prérequis liés au poste de travail. La philosophie centrale en ergonomie est d'adapter le travail à l'humain : cela implique d'adapter les postes de travail aux caractéristiques physiques de chaque individu. De plus, pour un poste de travail donné, deux morphologies différentes sont susceptibles d'effectuer l'activité de manières différentes (CHAFFIN et al., 2000), ce qui a une influence directe sur les postures et les forces générées, et donc sur le risque de TMS. La suite de la section passe en revue les principaux travaux en épidémiologie ayant étudié l'influence des facteurs morphologiques sur les risques de TMS.

#### 2.1.3.1 Dimensions corporelles

Les dimensions corporelles désignent l'ensemble des variables décrivant les longueurs et les proportions du corps humain. Le risque en termes d'ergonomie apparaît lorsque ces dimensions ne sont pas en adéquation avec celles du poste de travail. L'humain risque alors d'effectuer l'activité dans des postures inconfortables, voire ne pas parvenir à accomplir certaines tâches. L'effet des dimensions corporelles sur le risque de TMS a fait l'objet de nombreuses études en épidémiologie.

BOTHA et al. (1998) montrent pour une population d'infirmiers que l'apparition de certains TMS est spécifiquement liée à des paramètres anthropométriques, avec des effets particulièrement prononcés pour les morphologies extrêmes (c.-à-d. les morphologies ayant les plus petites ou plus grandes valeurs sur les dimensions anthropométriques mesurées). Les résultats de l'étude montrent que les infirmiers de grande taille déclarent significativement plus de douleurs sur le bas du dos. À l'inverse, les infirmiers de petite taille avec une portée de préhension<sup>1</sup> limitée déclarent plus fréquemment des douleurs au niveau du cou et de l'épaule. L'apparition de ces symptômes est liée aux tâches physiquement exigeantes (p. ex. soulever des patients, pousser des lits) et se retrouve aggravée par un mauvais dimensionnement des équipements de travail, à cause de lits trop bas (pour les plus grands) ou des étagères trop hautes (pour les plus petits). Sur une autre population d'infirmiers (LAAL et al., 2022), de manière similaire, le dos et les jambes sont plus fréquemment touchés par les TMS. La présence de symptômes liés aux TMS est corrélée avec certaines mesures corporelles telles que la taille ou la hauteur d'assise, ce qui suggère un dimensionnement des sièges non adapté pour des individus de grande taille.

---

1. La portée de préhension (*grip reach*) est la distance entre l'omoplate et la paume de la main lorsque le bras est tendu à l'horizontale ou à la verticale (PHEASANT, 1988).

CHUNG et al. (1997) centrent leur étude sur une population d'individus travaillant sur des postes de bureau en position assise. Le degré d'inconfort observé au niveau du dos et des épaules est lié à la taille de l'individu, mais aussi à la hauteur de la table et du dossier de chaise.

CHAFFIN et al. (2000) étudient l'effet de la taille sur le risque de TMS pour des conducteurs de véhicules, à travers l'observation des postures statiques en position assise. Pour les individus de grande taille, des postures moins extrêmes sont observées lorsque les cibles à atteindre sont éloignées du corps.

Dans l'ensemble des cas présentés, les auteurs insistent sur l'importance d'ajuster correctement les dimensions de l'espace de travail et des équipements afin de le rendre plus adapté à l'ensemble des travailleurs. Le poste de travail doit être ajustable par le travailleur (CHUNG et al., 1997) ou être dimensionné pour prendre en compte spécifiquement les morphologies les plus extrêmes (BOTHAN et al., 1998).

### 2.1.3.2 Capacités musculaires

Les capacités musculaires d'un individu correspondent aux forces musculaires maximales qu'il est capable de produire. En général, les TMS sont susceptibles d'apparaître lorsque la demande physique liée au travail excède les capacités physiques de l'individu. Ainsi, de faibles capacités musculaires pourraient être liées à une prévalence plus élevée de TMS pour des postes de travail où le travailleur doit exercer des forces importantes.

Pourtant, de nombreuses études épidémiologiques ne concluent pas sur l'existence d'un lien entre les capacités musculaires et le développement de TMS. HAMBERG-VAN REENEN et al. (2007) font une revue d'études longitudinales sur différentes populations. Les résultats ne sont pas concluants pour les TMS du dos à cause de résultats contradictoires et pour les TMS de l'épaule et du cou à cause du nombre limité d'études. FABER et al. (2012) n'observent pas d'augmentation de la prévalence des TMS pour les travailleurs ayant de faibles capacités musculaires, dans une étude longitudinale sur 5 ans et sur la population active. De même, TIMPKA et al. (2013) montrent sur une étude longitudinale de 17 ans que de faibles capacités musculaires ne permettent pas de prédire l'apparition de TMS sur les différentes parties du corps.

Cependant, ces études portent sur la population en général, sans prendre en compte le niveau de contrainte physique lié à l'activité professionnelle. FABER et al. (2012) suggèrent notamment dans ses perspectives d'examiner l'effet des capacités musculaires pour les travailleurs exposés à des tâches physiquement contraignantes, afin de voir si, dans ce cas, des capacités musculaires plus élevées peuvent aider à prévenir les TMS. Plus généralement, le lien entre des capacités musculaires insuffisantes et une prévalence élevée de TMS est difficile à établir. En effet, les capacités musculaires d'un individu peuvent varier dans le temps et augmenter grâce à un effet d'entraînement lié à l'activité professionnelle ou diminuer à cause des syndromes liés aux TMS.

En physiothérapie, le renforcement des capacités musculaires est en général conseillé pour réduire les symptômes liés aux TMS et prévenir leur apparition. Sur des individus atteints de TMS, plusieurs études montrent que des exercices de renforcement musculaire permettent de réduire les douleurs ressenties sur le bas du dos (BAYRAMOĞLU et al., 2001) ou sur le cou (DELLVE et al., 2011). Cependant, ces études ont été effectuées dans un cadre curatif : les mécanismes biologiques liés à la guérison ne sont pas forcément identiques à ceux pouvant mener au développement des TMS. Sur l'aspect préventif, VAN EERD et al. (2016) font une

revue des études sur l'effet des interventions ergonomiques pour la réduction des TMS. Une majorité d'études montre qu'un programme de renforcement musculaire contribue à réduire le risque de développer des TMS.

### 2.1.3.3 Obésité

L'obésité est un problème de santé publique dont la prévalence a rapidement progressé dans les pays occidentaux au cours des dernières décennies, au point d'être qualifiée d'épidémie (P. T. JAMES, 2004) par l'OMS (Organisation Mondiale de la Santé). L'obésité est définie par une augmentation excessive du poids liée à l'accumulation de tissus adipeux, ce qui peut réduire la mobilité et les capacités physiques de l'individu atteint. Dans les études épidémiologiques et démographiques, l'obésité se mesure généralement avec l'indice de masse corporelle (IMC), avec différents niveaux d'obésité allant du surpoids jusqu'à l'obésité massive (WEISELL, 2002).

De nombreuses études identifient l'obésité comme un facteur de TMS significatif, en plus d'être un facteur de risque pour d'autres maladies à l'origine d'arrêts de travail telles que le diabète et l'insuffisance cardiaque (BUCKLE et al., 2011 ; HIGGINS et al., 2020). En particulier, la prévalence de TMS est plus élevée dans les populations obèses pour les maladies articulaires du bas du corps (arthrose du genou, de la hanche et de la cheville) et pour le syndrome du tunnel carpien lié à une compression des nerfs causé par l'excès de tissus adipeux (HIGGINS et al., 2020). Un individu obèse possède en moyenne une proportion de masse musculaire plus faible par rapport à la masse totale, ce qui entraîne un stress plus important sur les muscles et les articulations.

La relation entre l'obésité et les douleurs au dos fait moins consensus (XU et al., 2008) : certaines études observent une corrélation (BOTHÀ et al., 1998 ; BAYRAMOĞLU et al., 2001 ; DARVISHI et al., 2022). À l'inverse, C.-Y. LEE et al. (2005) montrent que dans la population suisse, les douleurs au dos ne sont pas spécifiquement liées au degré d'obésité mais à un niveau de sédentarité élevé : un individu obèse pourrait donc compenser avec un entraînement musculaire adéquat, ce qui rejoint les remarques précédentes sur les capacités musculaires.

À noter que la plupart des études citées sont transversales et ne permettent pas de conclure que l'obésité est à l'origine des TMS observés (HIGGINS et al., 2020). L'effet de causalité pourrait être inversé : les douleurs liées aux TMS peuvent contraindre l'individu à adopter un mode de vie plus sédentarisé et moins sain, ce qui peut conduire à l'obésité.

### 2.1.3.4 Facteurs individuels

Les facteurs morphologiques sont eux-mêmes influencés par d'autres facteurs liés à l'individu. Plus largement, les facteurs individuels ont été étudiés dans le but d'identifier des caractéristiques propres à l'individu pouvant prédire le développement de TMS (COLE et al., 2004). Les facteurs individuels incluent les caractéristiques démographiques (p. ex. âge, sexe), anthropométriques (p. ex. taille, poids), physiologiques (p. ex. force, endurance) mais aussi des facteurs psychologiques (p. ex. personnalité, style de travail) et d'autres facteurs comportementaux pouvant influencer sur la santé du travailleur (p. ex. tabagisme, pratique sportive). Certains de ces facteurs sont plus accessibles, c.-à-d. plus facilement mesurables à l'échelle d'une population. De plus, l'influence de la morphologie peut être indirectement étudiée à travers les variations morphologiques induites par ces valeurs.

**Effets du genre** D'un point de vue morphologique, des différences importantes sont observées entre les hommes et les femmes. En moyenne, les hommes sont plus grands et avec des capacités physiques plus importantes que les femmes (MESSING et al., 1998). Les valeurs moyennes et les distributions pour des nombreuses dimensions corporelles diffèrent significativement (p. ex. sur la largeur des épaules ou la largeur du bassin). Il en résulte en général une affectation différente des activités dans les usines selon le genre, avec des tâches plus rapides sur des charges légères pour les femmes et inversement pour les hommes.

**Effets de l'âge** L'âge est un facteur qui a un effet significatif sur la morphologie de l'individu et principalement sur les capacités physiques. CHAFFIN et al. (2000) avancent que l'âge est associé à un déclin des performances sur des activités physiques, en matière de coordination motrice et de temps d'exécution. Un âge élevé est aussi lié à une réduction des capacités musculaires et de la flexibilité. Dans l'étude expérimentale menée par CHAFFIN et al. (2000), les conducteurs de véhicules plus âgés (>50 ans) privilégient les postures où le bras est moins levé avec le coude plus proche du corps.

**Effets de l'activité physique** L'activité physique est liée à l'activité professionnelle ou à la pratique sportive récréative, avec une influence directe sur les capacités musculaires d'un individu. Pour des activités industrielles, TORGÉN et al. (1999) montrent que des activités impliquant plus d'efforts physiques résultent en un renforcement des capacités musculaires pour certaines parties du corps. De plus, un manque de pratique sportive est associé au développement de TMS pour des activités physiquement exigeantes. Pour des sylviculteurs, MIRANDA et al. (2001) observent une réduction significative du risque de TMS pour les ouvriers ayant une pratique sportive régulière en dehors du travail.

**Analyse multi-factorielle** Les facteurs individuels cités ont une influence sur la morphologie de l'individu. De la même manière qu'avec les facteurs liés à l'activité (sous-section 2.1.2), la présence simultanée de plusieurs facteurs individuels/morphologiques peut amplifier le risque ergonomique. Par exemple, CHAFFIN et al. (2000) observent la posture la moins ergonomique pour la femme la plus âgée et la plus petite. De plus, d'autres facteurs non liés à la morphologie peuvent rentrer en jeu. Par exemple, les différences de comportements en rapport avec l'âge peuvent être liés à une expérience plus importante sur la tâche. En pratique, il est donc difficile d'isoler un facteur précis et étudier seulement l'influence de ce dernier en termes de risque ergonomique. Les effets de causalité sont complexes et mal connus. Des outils statistiques tels que l'analyse de chemin (ou de relations structurelles) se basent sur des graphes de causalité, ce qui permet une analyse multifactorielle et une meilleure modélisation de la contribution de chaque facteur (DARVISHI et al., 2022).

Il existe donc de nombreuses études en épidémiologie, ayant établi des liens entre les facteurs morphologiques (taille, IMC, capacités musculaires, etc.) et l'apparition de TMS. Les facteurs morphologiques sont eux-mêmes influencés par des facteurs individuels (tels que l'âge, le genre ou le niveau de sédentarité) dont l'influence sur le risque de développer des TMS a été largement étudiée. Ces études permettent donc de mieux comprendre en quoi le facteur morphologie est important à prendre en compte en évaluation ergonomique. Cependant, ces preuves épidémiologiques n'indiquent en rien comment réduire la prévalence des TMS. Dans la suite du chapitre, nous présentons les principales méthodes développées et utilisées en ergonomie pour la prévention des TMS.

## 2.2 Standards d'évaluation en ergonomie

En pratique, l'ergonome dispose de nombreux outils pour estimer le niveau d'exposition d'un travailleur à des TMS à travers l'analyse des facteurs de risque (DAVID, 2005). Parmi ces outils, les questionnaires permettent d'avoir le ressenti des ouvriers concernant les tâches effectuées dans le cadre d'études épidémiologiques. Les normes et les standards définissent des limites à respecter et des recommandations à suivre concernant la charge de travail physique et les dimensions d'un poste de travail. Enfin, l'ergonome peut observer directement l'ouvrier durant son activité, les indicateurs ergonomiques sont des métriques permettant d'évaluer le niveau de risque et de proposer des améliorations à suivre.

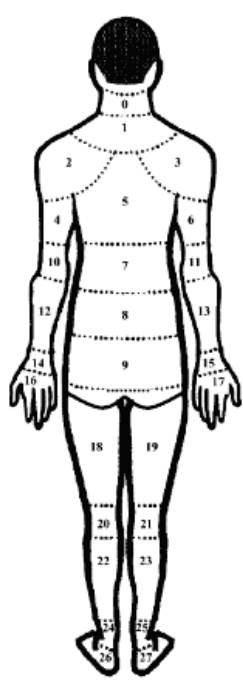
### 2.2.1 Questionnaires

Les questionnaires sont couramment utilisés par les ergonomes pour interroger les travailleurs sur leurs conditions de travail et leur ressenti par rapport aux activités effectuées. Selon le format expérimental, le questionnaire peut être rempli par l'ergonome au cours d'entretiens, et/ou par les travailleurs eux-mêmes, en particulier pour les études sur une population large. Il s'agit de l'approche la plus classique pour récolter des données sur le terrain. Cette approche ne nécessite pas d'avoir recours à des dispositifs expérimentaux spécifiques et coûteux. En contrepartie, l'approche peut s'avérer potentiellement chronophage pour l'ergonome pour élaborer le questionnaire et effectuer les entretiens.

En ergonomie physique, certains questionnaires spécifiques sont employés pour identifier des symptômes liés aux TMS, en mesurant la sensation d'inconfort, voire les douleurs physiques ressenties par les travailleurs. Des méthodes provenant du milieu médical servent à mesurer le niveau de douleurs corporelles, telles que le McGill Pain Questionnaire (MELZACK, 1975) ou le Brief Pain Inventory (TAN et al., 2004). Le patient est interrogé sur la localisation et l'intensité des douleurs ressenties, afin d'établir un diagnostic médical et permettre la mise en place d'un traitement adapté. En ergonomie des postes de travail, le questionnaire Nordique (KUORINKA et al., 1987) sert plus spécifiquement à identifier les douleurs liées aux TMS. Dans cette méthode, le corps humain est divisé en plusieurs parties sous la forme d'une carte (voir [figure 2.1](#)). Pour chaque partie du corps, le travailleur est interrogé sur la fréquence, l'intensité et la persistance des douleurs au cours des derniers mois. Par rapport à des méthodes cliniques, le questionnaire Nordique est moins précis à cause du découpage relativement arbitraire du corps. Cette méthode permet cependant une évaluation rapide et complète des douleurs ressenties pendant l'activité.

Ces questionnaires permettent donc d'avoir des données sur le terrain des douleurs physiques en lien avec les TMS et avec un aspect longitudinal. Dans le cadre d'études épidémiologiques, ces méthodes sont indispensables afin de faire les liens entre des facteurs de risque et l'apparition de TMS. Cependant, ce type de mesure peut manquer de précision et de cohérence, car il fait appel à un ressenti subjectif de l'individu et parfois par rapport à un passé lointain. De plus, il est courant qu'un ouvrier sous-évalue les symptômes, de manière consciente ou non. Ceci peut être causé par des barrières psychologiques liées à une perception erronée de la gravité des symptômes (MORDEN et al., 2014), du coût des soins ou de la peur de perdre son travail (HOOFTMAN et al., 2008). Enfin, les questionnaires constituent une mesure a posteriori (c.-à-d. un diagnostic) lorsque les symptômes sont déjà présents. En ergonomie, il est souhaitable de prévenir ces symptômes en identifiant au plus tôt les facteurs





No	Location	Grade of complaints			
		A	B	C	D
0	Pain/stiff in the upper neck				
1	Pain in the lower neck				
2	Pain in the left shoulder				
3	Pain in the right shoulder				
4	Pain in the left upper arm				
5	Pain in the back				
6	Pain in the right upper arm				
7	Pain in the waist				
8	Pain in the buttock				
9	Pain in the bottom				
10	Pain in the left elbow				
11	Pain in the right elbow				
12	Pain in the left lower arm				
13	Pain in the right lower arm				
14	Pain in the left wrist				
15	Pain in the right wrist				
16	Pain in the left hand				
17	Pain in the right hand				
18	Pain in the left thigh				
19	Pain in the right thigh				
20	Pain in the left knee				
21	Pain in the right knee				
22	Pain in the left calf				
23	Pain in the right calf				
24	Pain in the left ankle				
25	Pain in the right ankle				
26	Pain in the left foot				
27	Pain in the right foot				

FIGURE 2.1 – Fiche inspirée du questionnaire Nordique (KUORINKA et al., 1987) pour identifier des symptômes de TMS.

de risque et en prenant les mesures appropriées. Il est donc important de disposer d'outils pratiques permettant à l'ergonome d'évaluer le risque de TMS en se basant sur l'observation du comportement des travailleurs.

### 2.2.2 Normes et recommandations

La normalisation des pratiques en ergonomie a pour but d'établir un référentiel commun en termes de documentation et de pratiques pour tous les professionnels du milieu. Ce processus de normalisation sert à mieux protéger les travailleurs et les utilisateurs en général, par la définition de nouvelles exigences ergonomiques pour les législateurs. Ce processus permet aussi une démocratisation de la discipline en posant des bases communes sur lesquelles peuvent s'appuyer les méthodes et les outils développés dans l'industrie.

Cet effort de normalisation s'est amorcé après la seconde guerre mondiale, avec l'intérêt grandissant pour les problématiques liées à l'ergonomie et la prise de conscience des effets des TMS sur la productivité et sur la santé à long terme. En 1973, le séminaire de Lansborough organisé par l'IEA (International Ergonomics Association) a constitué le premier effort international pour mieux coordonner les travaux jusqu'ici menés individuellement dans chaque pays (PARSONS et al., 1995). Plusieurs axes de travail ont été identifiés et ont guidé les efforts de normalisation sur les décennies suivantes :

- identifier les propriétés fondamentales liées aux humains, c'est-à-dire leurs capacités et leurs limites, sur le plan physique, cognitif ou social. Cet axe touche donc aux domaines de l'anthropométrie, de la biomécanique et de la psychologie.
- identifier les principes de conception des systèmes ou procédés qui permettent d'améliorer l'ergonomie et de mieux prendre en compte les spécificités de chaque ouvrier.

- définir des procédures de test et de traitement des données, afin de garantir la qualité des études.
- coordonner les efforts à l'échelle internationale pour éviter des doublons, voire des conflits entre les normes de différents pays.

L'année suivante en 1974, le comité technique « TC 159 - Ergonomie » est créé à l'ISO (International Standardisation Organization). Ce groupe de travail collabore étroitement avec l'IEA mais aussi avec les organismes de normalisation du monde entier (CEN, AFNOR, etc.) dans le but d'établir et de mettre à jour des standards communs adaptés aux différentes pratiques.

Pour améliorer l'ergonomie des postes de travail, de nombreuses normes ont été établies et sont continuellement mises à jour par les organismes de standardisation (DUL et al., 1996). Un rôle important de ces normes est de définir les limites physiques à ne pas dépasser pour les scénarios de travail typiquement rencontrés. Par rapport aux facteurs de risque évoqués précédemment (sous-section 2.1.2), les limites physiques à définir portent sur les postures de l'humain, l'intensité, la fréquence et la durée du travail. Il existe de nombreuses normes et standards ; ici le but n'est pas d'en donner la liste exhaustive. Par exemple, la norme ISO 11226 (ISO, 2000) établit les limites articulaires recommandées pour des postures statiques impliquant des efforts minimes. En France, la norme NF-1005-4 (AFNOR, 2008) complémente cette norme et considère les mouvements en plus des postures de l'humain sur une variété d'activités. Pour des activités de manutention manuelle, la norme ISO 11228 définit des recommandations pour trois types de scénarios : pour le déplacement de charges lourdes (>3 kg) avec une marche modérée (ISO, 2021), pour des activités impliquant de tirer et pousser des charges (ISO, 2007a) et pour des tâches répétitives à fréquence élevée avec des charges légères (ISO, 2007b). Ces recommandations reposent sur des études épidémiologiques et visent à offrir une protection acceptable face au risque de TMS pour la majorité de la population active. Ces normes définissent des principes et des limites, qui servent ensuite de base pour les outils méthodologiques et les outils de simulation utilisés par les ergonomes.

### 2.2.3 Métriques d'évaluation

Un indicateur ergonomique est un outil méthodologique qui permet à l'ergonome de quantifier le risque de TMS via l'observation du travailleur durant son activité. À l'origine, les indicateurs ergonomiques ont été conçus pour permettre une évaluation rapide sans avoir besoin de dispositifs coûteux et invasifs pouvant gêner les mouvements du travailleur. Typiquement, l'ergonome évalue différents paramètres liés à la posture du travailleur ou à la configuration du poste de travail. L'indicateur ergonomique prend ces paramètres en entrée et donne en sortie un score qui indique le niveau de risque ergonomique. Ces méthodes ont été validées par rapport à des études épidémiologiques. De nombreux indicateurs ergonomiques sont utilisés dans l'industrie et permettent d'évaluer le risque dans divers scénarios (DAVID, 2005). Le choix de la méthode dépend de l'application précise, de l'objectif de l'analyse ainsi que les contraintes en temps et en ressources.

L'un des indicateurs les plus utilisés est la méthode RULA (Rapid Upper Limb Assessment) (MCATAMNEY et al., 1993) pour avoir une estimation rapide du niveau de risque ergonomique sur le haut du corps. Le calcul du score RULA prend en compte principalement les angles articulaires du haut du corps, mais aussi dans une moindre mesure le poids de la charge manipulée et la fréquence de travail (figure 2.2). Cette méthode ne considère pas la



locomotion et le risque pourtant existant pour les articulations du bas du corps dans certaines situations. De plus, la méthode évalue une posture statique et ne prend pas en compte les mouvements et les séquences d'actions.

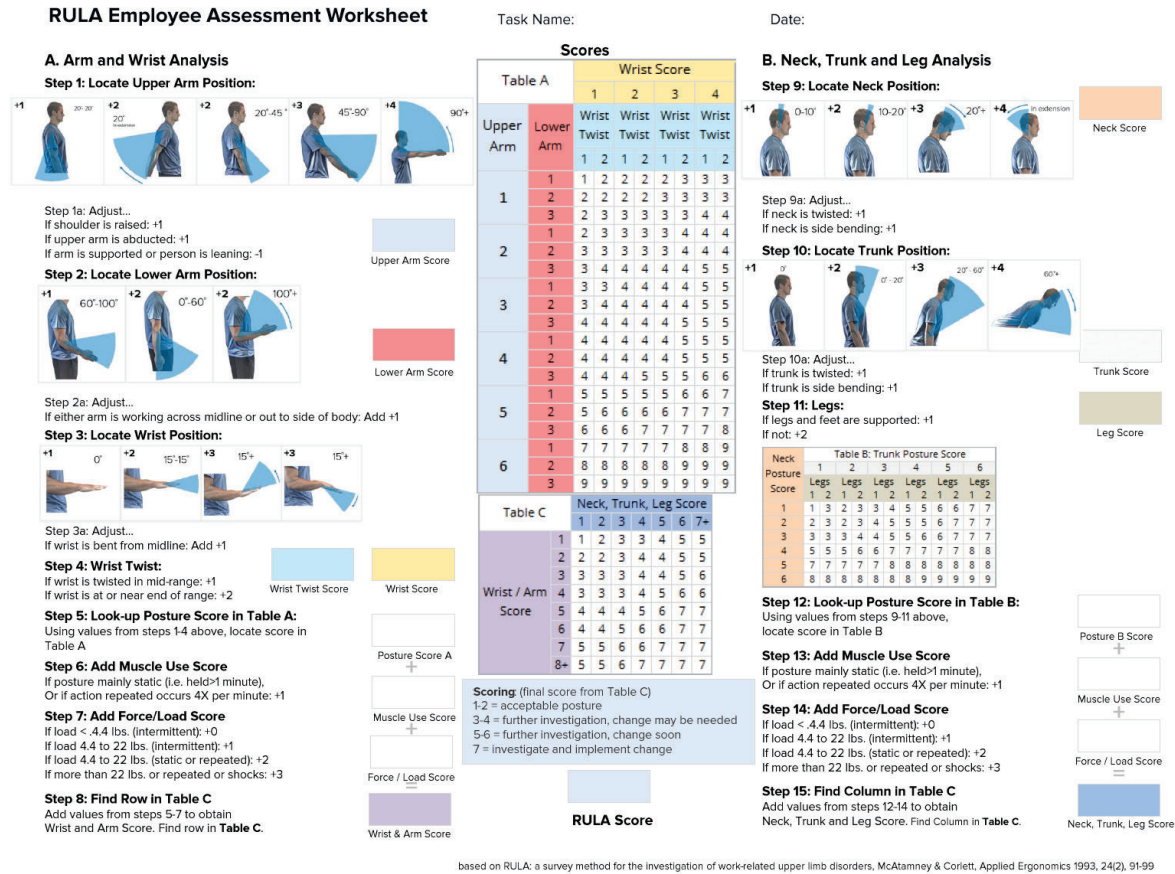


FIGURE 2.2 – Fiche d'évaluation complète pour la méthode RULA (McATAMNEY et al., 1993).

D'autres méthodes prennent en compte l'aspect temporel avec plus de précision. La méthode OWAS (Ovako Working posture Analyzing System) peut considérer plusieurs postures et calculer un risque pondéré par la fréquence de chaque posture (KARHU et al., 1981). L'index OCRA (Occupational Repetitive Action) se focalise sur la répétitivité des tâches et des périodes de récupération (OCCHIPINTI, 1998). Le Strain Index (MOORE et al., 1995) propose une approche encore plus simple pour les tâches manuelles et répétitives. La méthode se limite à seulement 6 facteurs de risque incluant la posture de la main, l'intensité, la fréquence et la durée de l'effort.

Les méthodes précédemment citées se focalisent sur la charge physique appliquée sur le haut du corps, où les TMS sont les plus fréquents. Cependant, le risque de TMS sur les genoux ou les pieds ne doit pas être négligé sur certains postes de travail où le bas du corps est sollicité (p. ex. lorsque l'humain doit se déplacer, s'accroupir, ou simplement rester debout pendant une période prolongée). La méthode REBA (Rapid Entire Body Assessment) est une extension de RULA pour évaluer les risques liés à la posture sur l'ensemble du corps (HIGNETT et al., 2000). La méthode EAWS (Ergonomic Assessment WorkSheet) considère des postures complètes ainsi que des actions standardisées et utilisées pour planifier le travail

sur des chaînes de production (SCHAUB et al., 2012), à la manière des MTM (Methods-Time Measurements) (MAYNARD et al., 1948). La méthode de calcul du score EAWS est cependant plus complexe et nécessite l'utilisation d'outils logiciels dédiés.

Enfin, d'autres indicateurs s'intéressent plus spécifiquement aux efforts liés au port de charges. L'équation de NIOSH (WATERS et al., 1994) permet de calculer une limite de poids porté recommandée à partir de différents facteurs liés à l'amplitude du mouvement et la fréquence de réalisation. La méthode TLV (Threshold Limit Values) (ACGIH, 2024) donne des recommandations pour les tâches manuelles sous la forme de limites à ne pas dépasser en matière d'efforts ou de charges physiques.

Les indicateurs présentés sont simples et rapides à calculer, mais manquent de précision. En particulier sur des méthodes de type RULA, des seuils arbitraires sont définis sur les facteurs de risque mesurés (angles articulaires, charge, etc.) et sur le niveau de risque final. Le calcul de la métrique combine des grandeurs de natures différentes (angles articulaires, fréquences, durées, efforts, etc.), ce qui rend le score difficilement interprétable en dehors de l'échelle de risque proposée. En outre, ces indicateurs comportent une part importante de subjectivité : le risque estimé peut varier selon la personne effectuant l'évaluation ergonomique, à cause d'éléments contextuels non pris en compte par la méthode de calcul. Sur les approches posturales (RULA, REBA, OWAS, etc.), l'ergonome doit choisir des postures clés sur lesquelles calculer le risque. De plus, si un facteur est situé sur un seuil, l'ergonome doit choisir entre un risque plus faible ou plus élevé ce qui influence l'analyse du poste de travail. Avec ces méthodes, l'expérience de l'ergonome reste donc indispensable avec de nombreux éléments restant à l'appréciation de l'expert.

Dans la communauté robotique, des versions plus détaillées des indicateurs présentés sont utilisées grâce à l'accès au modèle de l'humain. Par exemple pour RULA, il existe des variantes continues avec RULA-C (GOMES et al., 2022), voire différentiables avec DUBA (YAZDANI et al., 2022). Ces variantes permettent d'appliquer RULA comme une fonction de coût, dans des problèmes d'optimisation de la posture par exemple. En outre, MAURICE (2015) fait une revue d'indicateurs « biomécaniques » pertinents en analyse ergonomique. Ces indicateurs représentent des grandeurs cinématiques et dynamiques agrégées dans le temps, telles que les angles articulaires (relatifs à la posture ergonomique neutre), les couples articulaires, la manipulabilité ou l'équilibre dynamique. Ces indicateurs biomécaniques visent à fournir des valeurs plus objectives ayant un sens physique directement interprétable. Cependant, par rapport aux indicateurs ergonomiques établis (p. ex. RULA), ces valeurs ne sont pas reliées à des niveaux de risques de TMS à travers des études épidémiologiques. Les indicateurs biomécaniques permettent tout de même une comparaison relative du score ergonomique, par exemple entre plusieurs morphologies sur une même activité.

L'ensemble de ces métriques a donc pour but d'évaluer le risque lié aux TMS pour une multitude de scénarios de postes de travail. Ces métriques se basent principalement sur les facteurs de risque physique liés à l'activité (sous-section 2.1.2) et ne considèrent pas directement les facteurs morphologiques. Pour étudier l'adéquation d'un poste de travail à une variété de morphologie, il reste donc nécessaire d'observer l'influence de la morphologie sur ces métriques d'évaluation, sur des travailleurs réels ou en simulation.

## 2.3 Outils de simulation

Avec l'industrie 4.0, les chaînes de production sont de plus en plus automatisées tout en gardant une certaine flexibilité face aux besoins des clients et à l'effectif de travail disponible. Cela implique d'effectuer régulièrement des changements sur la conception des postes de travail et sur l'organisation du travail. Il existe donc une demande forte pour des outils capables d'évaluer de manière efficace si un nouveau poste ne présente pas de risques à long terme pour la santé des travailleurs.

Classiquement, l'évaluation ergonomique requiert que le travailleur ait effectué ou soit en train de faire l'activité sur un poste de travail existant. Cependant, la vérité terrain n'est pas toujours accessible : la création d'un poste de travail physique est souvent issue d'un processus itératif long et coûteux. Les outils de simulation d'humains virtuels permettent d'outrepasser cette exigence et de réduire les coûts de conception et de mise en production : l'ergonomie de l'activité peut être évaluée au plus tôt, avant de devoir construire un prototype physique. De plus en simulation, l'état de l'ensemble des objets simulés est accessible ce qui permet de produire des analyses plus détaillées. Les modèles doivent alors être suffisamment réalistes par rapport à l'humain pour que les résultats d'analyse soient valides et interprétables en termes de risque ergonomique ; le temps de calcul doit être raisonnable et adapté à l'application visée.

Dans le cadre de la thèse, nous proposons plus précisément d'explorer des méthodes pour faciliter l'animation d'humains virtuels ([Problème 1.1](#)) et pour générer des comportements d'humains sur une large population ([Problème 1.2](#)). Pour cela, plusieurs critères doivent être considérés et orientent le choix de la méthode de simulation. D'une part, la simulation doit être le plus réaliste possible, pour se rapprocher des phénomènes physiques et comportementaux observés sur les travailleurs. Ensuite, le coût de simulation doit être suffisamment faible, afin de pouvoir simuler une large population d'humains virtuels (et en temps interactif). Enfin, les outils développés doivent être accessibles à des non-informaticiens, que ce soit pour configurer les humains virtuels ou pour visualiser les résultats de simulation.

La section commence par faire une revue des outils de simulations d'humains virtuels existants. Ensuite, les méthodes pour modéliser l'humain et sa variabilité sont présentées. Enfin, les méthodes d'animations sont présentées avec une attention particulière sur les approches liées à la robotique et aux méthodes d'apprentissage.

### 2.3.1 Simulations d'humains virtuels

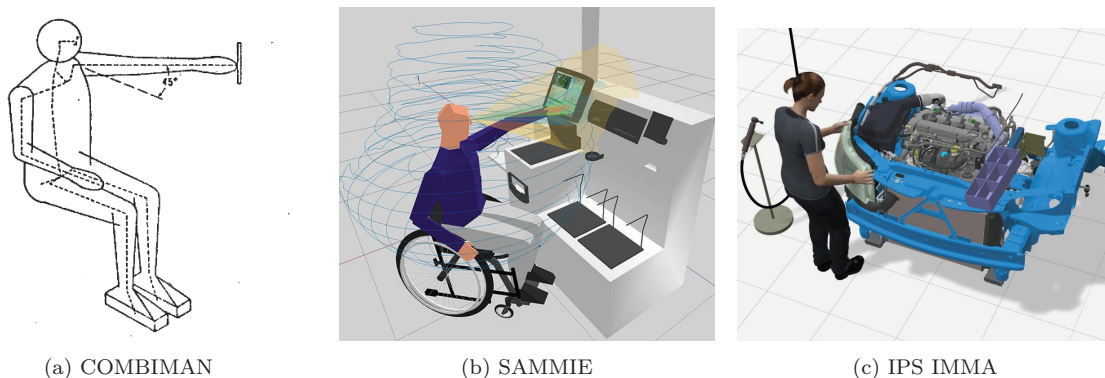


FIGURE 2.3 – Aperçu graphique de l'évolution des logiciels d'humains virtuels, depuis 1970 jusqu'à nos jours.

Les premiers outils de simulation d'humains virtuels apparaissent dans les années 1970, dans un contexte d'essor des outils informatiques et de la conception assistée par ordinateur. La motivation principale est de réduire les coûts de conception et d'éviter de construire des prototypes coûteux et difficiles à modifier. CYBERMAN (WATERMAN et al., 1978) ou COMBIMAN (MCDANIEL, 1976) font partie des premiers outils qui se basent sur un modèle géométrique en 3D et ajustable de l'humain (figure 2.3a). Ces outils permettent de calculer les postures de l'humain et de vérifier le dimensionnement des postes de travail, pour différents centiles de travailleurs. Le rendu graphique sous forme de dessin technique prenaient alors plusieurs minutes.

Les forces exercées sur l'humain sont aussi importantes à prendre en compte. Les logiciels 3DSSPP (CHAFFIN et al., 1991) est un des pionniers, avec l'analyse en statique des efforts internes et de l'équilibre de l'humain.

Certains logiciels spécialisés ont été développés, en particulier dans l'industrie automobile. On peut citer RAMSIS pour la conception de siège et d'habitacle de véhicule confortables (WIRSCHING, 2019) ou MADYMO simuler les effets mécaniques de crash-tests sur le corps humain (MALTHA et al., 1980).

Il est cependant souhaitable de disposer de modèles d'humains virtuels génériques capables de simuler une variété de scénarios de poste de travail. Le logiciel SAMMIE (BONNEY et al., 1974) est un des premiers logiciels intégrant de telles fonctionnalités (figure 2.3b). Par la suite, de nombreux logiciels similaires sont apparus et continuent d'être développés de nos jours dans les milieux académiques et industriels, tel que Siemens Jack (RASCHKE et al., 2019), Delmia SAFEWORK (CHARLAND, 2019), Santos (ABDEL-MALEK et al., 2019) ou IPS IMMA (HANSON et al., 2019). Ces solutions logiciels intègrent en général une multitude de fonctionnalités pour automatiser le processus d'analyse (figure 2.3c).

Dans ces logiciels d'humains virtuels, les principales fonctionnalités mises en avant sont les suivantes (CHAFFIN, 2008) :

- la modélisation de populations d'**humains de morphologies différentes**, basée sur des données anthropométriques.
- la création de **mannequins « autonomes et intelligents »**. Dans l'idéal, les humains virtuels réalisent l'activité à partir d'un minimum d'instructions de la part de l'utilisateur. Les mouvements (ou postures) de l'humain sont générés automatiquement, à partir de données expérimentales issues de l'opérateur réel ou d'une spécification précise de l'activité à réaliser.
- des **outils d'analyse**, pour étudier la faisabilité (atteignabilité, manipulabilité, champ de vision, ...) et l'ergonomie (efforts, posture, équilibre, ...) d'une activité.
- l'**intégration logicielle** avec d'autres outils informatiques utilisés dans l'industrie (pour concevoir des postes de travail de type industriel, faire des rendus graphiques, etc.) dans le but de faciliter le travail des concepteurs. Certains simulateurs (Jack, DELMIA ou IMMA) font partie de suites logicielles (respectivement Technomatix, 3DS et IPS) de type PLM (*Product-life Management*), qui permettent de gérer le cycle complet d'un produit, depuis la conception de moyens de fabrication jusqu'aux produits finaux, avec une prise en compte de l'ergonomie à tous les niveaux.

D'autres logiciels sont spécialisés dans les modèles biomécaniques de l'humain, tels que Opensim (DELP et al., 2007) ou Anybody (DAMSGAARD et al., 2006). Ces outils sont surtout utilisés dans la recherche, pour étudier le mouvement et les efforts musculaires de l'humain et pour des applications nécessitant une compréhension du fonctionnement de l'humain à



un niveau musculo-squelettique. Actuellement, ces logiciels prennent en compte de manière limitée les fonctionnalités citées ci-dessus, ce qui rend leur utilisation difficile dans un contexte de conception des postes de travail.

## 2.3.2 Modèles d'humain virtuels

### 2.3.2.1 Types de modèles

Plusieurs approches existent pour concevoir un humain virtuel : les modèles articulés, musculo-squelettiques et volumétriques. Le choix de l'approche dépend principalement du type d'analyse souhaité, mais avec aussi un compromis à faire entre le niveau de réalisme et les capacités en calcul disponibles.

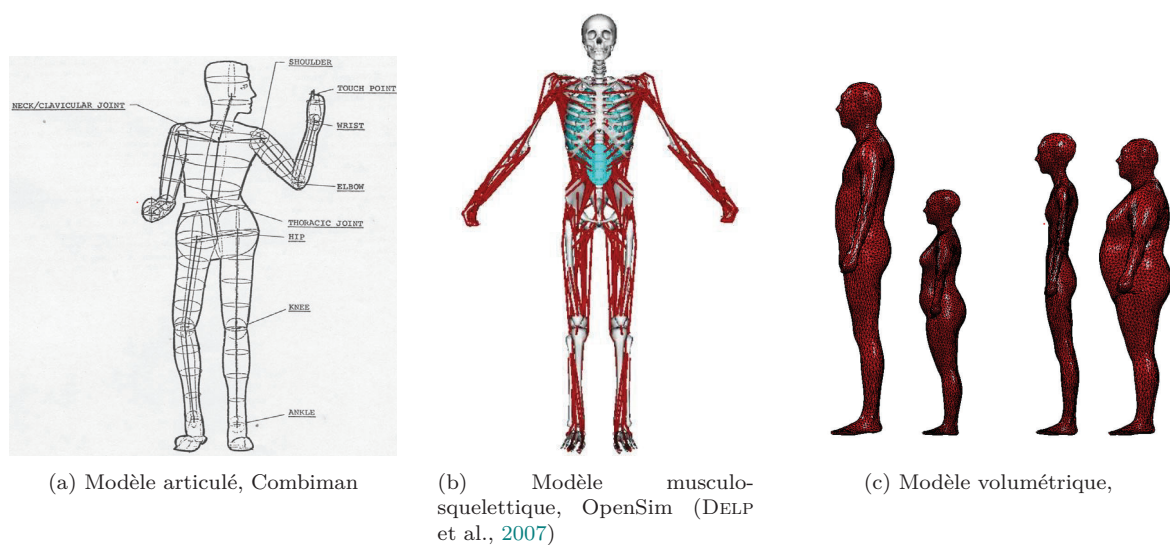


FIGURE 2.4 – Aperçu graphique de l'évolution des logiciels d'humains virtuels, depuis 1970 jusqu'à nos jours.

**Modèles articulés** Dans un modèle articulé, l'humain est défini par une chaîne cinématique, composée de corps rigides reliés par des liaisons mécaniques en rotation (pivot, rotule à doigt ou rotule). Les corps rigides correspondent à différentes parties du corps et sont typiquement modélisés par des segments dotés d'une matrice d'inertie.

D'un point de vue fonctionnel, le modèle articulé est un modèle simplifié de l'humain, qui fait abstraction des phénomènes musculaires. Cette simplification permet de réduire la complexité du modèle cinématique et dynamique de l'humain virtuel. Il en résulte un coût plus faible (par rapport à des modèles musculo-squelettiques, voir paragraphe suivant) pour animer l'humain virtuel, calculer les couples articulaires et d'autres indicateurs pertinents dans l'analyse ergonomique (p. ex. la manipulabilité, la portée d'atteinte, l'énergie dépensée).

Les modèles articulés sont utilisés dans divers domaines, pour modéliser des systèmes robotiques, pour modéliser l'humain en biomécanique ou pour modéliser des personnages dans le domaine de l'animation. Il existe une multitude de modèles articulés d'humains, qui diffèrent sur la configuration et le nombre de degrés de liberté (DDL), selon le niveau de précision souhaité. Les simulateurs d'humains virtuels mentionnés précédemment ([sous-section 2.3.1](#)) se basent pour la plupart sur des modèles articulés de l'humain. Le logiciel CYBERMAN comporte 18 articulations (WATERMAN et al., 1978) et est configurable pour de scénarios courants. Sur des logiciels plus récents, des modèles plus complexes sont utilisés.

Par exemple, l'humain virtuel Jack (RASCHKE et al., 2019) dispose de 135 DDLs (pour 69 articulations), contre 162 DDLs pour IMMA (HANSON et al., 2019) et 215 DDLs pour SANTOS (ABDEL-MALEK et al., 2019). Ces modèles sont plus détaillés sur les DDLs sur certaines parties du corps (sur le dos, les mains, les pieds) et permettent une analyse plus détaillée des mouvements de l'humain et des efforts internes causés par du port de charges lourdes, en particulier sur la colonne vertébrale.

**Modèles musculo-squelettiques** Dans un modèle musculo-squelettique (ou modèle MS), l'humain virtuel est défini par une structure squelettique rigide et un ensemble de muscles et de tendons attaché à la structure squelettique. La contraction des muscles est modélisée comme un actionneur linéaire et permet d'animer le modèle humain.

Cette approche cherche à reproduire au mieux l'anatomie et le fonctionnement du corps humain, en se basant sur les modèles anatomiques de l'humain et les modèles physiologiques issus des travaux dans le domaine de la biomécanique. Ce type de modèle permet des analyses plus détaillées sur la contribution des différents groupes musculaires en termes de mouvements et d'efforts générés sur le corps.

Par rapport aux modèles articulés, ces modèles sont cependant plus complexes avec un coût de simulation plus important. Le corps humain comporte beaucoup plus de muscles que de degrés de liberté. À cause de cette redondance élevée, des méthodes d'optimisation plus coûteuses sont nécessaires pour résoudre la cinématique inverse ou calculer les forces musculaires d'actionnement. Une autre difficulté liée aux modèles MS est que ces modèles sont difficiles à paramétrer si l'on veut reproduire une morphologie précise provenant d'un humain réel. Le positionnement et le dimensionnement des muscles et des os ont un effet important sur la dynamique du modèle.

Les principaux logiciels pour travailler sur des modèles musculo-squelettiques sont OpenSim (DELP et al., 2007) et Anybody (DAMSGAARD et al., 2006). Ces logiciels sont principalement utilisés dans le domaine médical et en réhabilitation, ou dans le domaine sportif, pour analyser l'effet de mouvements observés sur les efforts musculaires produits par l'humain.

**Modèles volumétriques** Dans un modèle volumétrique, l'humain virtuel est défini par l'enveloppe en 3D correspondant à la forme du corps. Pour simuler des humains virtuels, le modèle volumétrique est en général associé à un squelette sous-jacent (articulé ou MS) qui permet de définir les postures et les mouvements de l'humain. Le modèle peut être défini à partir directement des dimensions du squelette, sous formes de volumes géométriques élémentaires. Un modèle plus réaliste basé sur un maillage polygonal peut aussi être utilisé. Cette approche nécessite cependant quelques étapes supplémentaires (*rigging*, *skinning*), pour correctement attacher le maillage sur le squelette et pour éviter des déformations non naturelles de celui-ci sur certains mouvements de l'humain.

En ergonomie, ce type de modèle sert à détecter des problèmes de dimensionnement et d'accessibilité sur un poste de travail, via la détection des collisions. Un modèle plus réaliste (c.-à-d. basé sur un maillage polygonal) permet une analyse plus précise au niveau des collisions, avec contrepartie un coût plus important pour gérer les collisions. Ces modèles sont typiquement créés à partir de logiciels de modélisation 3D tels que Maya ou Blender.

Chaque modèle d'humain présenté est entièrement configurable pour créer une variété de morphologies, avec l'outil d'édition adapté. Par exemple, pour les modèles articulés, les paramètres anthropométriques peuvent être spécifiés dans un format URDF (Unified Robot

Description Format) pour définir la morphologie de l'humain. La question est maintenant de savoir comment paramétrer ces modèles, afin de générer des morphologies représentatives de la population réelle.

### 2.3.2.2 Variabilité morphologique

Avec la simulation, il existe donc différentes manières de modéliser l'humain virtuel. Ces modèles sont paramétrables sur la base de données morphologiques réelles, ce qui permet d'étudier l'effet de la morphologie dans les simulations d'humains virtuels.

Pour les dimensions corporelles, l'anthropométrie s'intéresse à la mesure et à la modélisation des dimensions du corps humain. Dans un contexte d'ergonomie des postes de travail (PHEASANT, 1988), les mesures portent sur les longueurs des segments du corps (p. ex. taille totale, longueur des bras et des jambes, largeur de la hanche), sur les masses (p. ex. masse totale ou pour chaque partie du corps), sur des proportions (p. ex. hauteur de la hanche relative à la taille) et sur des dimensions liées à l'activité (p. ex. hauteur d'assise, hauteur des yeux en position debout).

Quant aux capacités musculaires, celles-ci sont étudiées dans le domaine de la dynamométrie (BALZOPOULOS, 2007). Les mesures portent sur la force de préhension, sur les forces que l'humain peut produire sur différentes parties du corps (et qui se traduit ensuite en couples articulaires ou forces musculaires). Les mesures peuvent se faire en statique (mesure isométrique) ou sur une amplitude de mouvement fixe (mesure isocinétique) à l'aide de dynamomètres.

La suite de la section donne plus de détails sur les bases de données de caractéristiques humaines existantes et sur les méthodes utilisées en pratique pour prendre en compte la morphologie dans un contexte de conception des postes de travail.

**Bases de données d'humains** De nombreuses bases de données anthropométriques ont été construites pour avoir des échantillons d'individus représentatifs de populations réelles (figure 2.5). Les premières bases de données utilisées en ergonomie considèrent la population américaine civile avec NHANES (FRYAR et al., 2012) ou militaire avec ANSUR (GORDON et al., 2014); ces bases de données sont encore régulièrement mises à jour. La base de données CAESAR (ROBINETTE et al., 1999) couvre une population plus étendue (Europe et Etats-Unis) et comprend des données volumétriques en plus des données sur les dimensions corporelles. Dans de nombreux pays, des projets d'études dans le cadre de la santé publique ont permis d'établir des bases anthropométriques spécifiques à la population active du pays, par exemple à Taiwan (M.-J. J. WANG et al., 2002), au Portugal (BARROSO et al., 2005) ou au Japon (YONEI et al., 2008). Cette abondance de travaux et de données en anthropométrie est liée à une définition relativement précoce de la méthodologie de mesure (PHEASANT, 1988) et de standards associés. Il existe des normes internationales guidant la création de bases anthropométriques, sur les dimensions anthropométriques à considérer (ISO, 2017) ou sur la méthodologie pour constituer un échantillon d'humains représentatif d'une population (ISO, 2022).

Pour les capacités musculaires, il existe de nombreux travaux plus isolés pour mesurer les capacités de groupes musculaires précis. Par exemple, dans l'enquête NHANES sur la population américaine, seules la force de préhension (population active) et la force du quadriceps (population âgée) ont été étudiées. Les valeurs moyennes des couples articulaires sur l'ensemble des DDLs du corps humain peuvent être obtenus, en croisant les résultats de différentes études (CHAFFIN et al., 2006; HOLZBAUR et al., 2005; LECOMPTE et al., 2007;

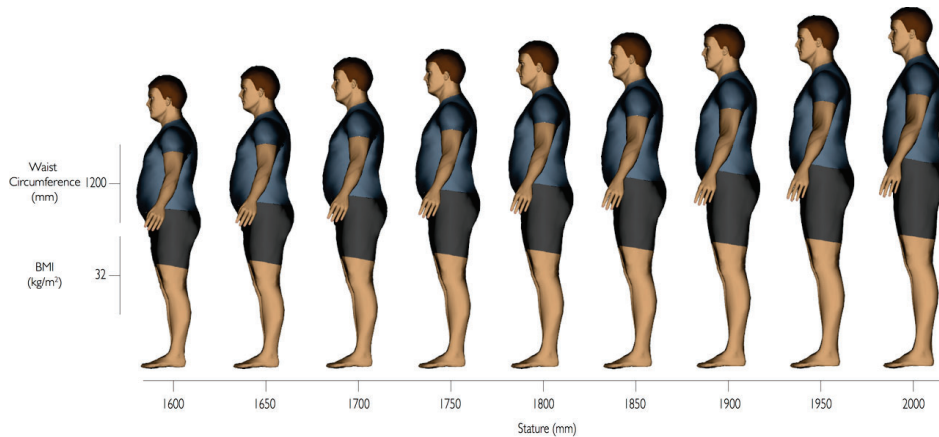


FIGURE 2.5 – Différentes morphologies d'humains virtuels, provenant de la base de données anthropométriques NHANES (National Health and Nutrition Examination Survey) (FRYAR et al., 2012)

GOLDMANN et al., 2012), dont la méthodologie expérimentale peut varier d'une étude à l'autre. Des efforts de standardisation sont en cours afin d'établir des pratiques communes pour la création des bases de données de force humaine (ISO/WD 22567).

**Prise en compte de la variabilité morphologique** Lors de la conception d'un poste de travail, les dimensions et les tâches effectuées doivent être ajustées en fonction des dimensions corporelles et des capacités musculaires des individus.

En ingénierie anthropométrique (PHEASANT, 1988), il existe des recommandations principalement basées sur la géométrie pour dimensionner des postes de travail en fonction des dimensions corporelles, pour des scénarios courants au travail (p. ex. position assise, position debout, prise d'objet).

Les bases anthropométriques connues sont en général intégrées dans les logiciels d'humain virtuels dans le but de générer des familles d'humains (c.-à-d. un ensemble d'humains virtuels de morphologies différentes et représentatives de la population réelle). Ces logiciels permettent d'aller au-delà des considérations purement géométriques, avec une analyse plus poussée basée sur les grandeurs cinématiques et dynamiques de l'humain virtuel. Pour générer un échantillon d'humains virtuels, une approche classique consiste à prendre des individus correspondant à des centiles de la population, par rapport à différents paramètres anthropométriques. Il est reconnu que varier un paramètre anthropométrique à la fois conduit à une diversité morphologique limitée (HÖGGERG et al., 2015). L'anthropométrie multi-variée cherche à générer un échantillon d'humains virtuels à partir de plusieurs variables anthropométriques clefs (par exemple la taille, la hauteur d'assise et la largeur du bassin pour des postes de travail assis) (FRAGOSO, 2020). (HÖGGERG et al., 2015) présente la méthode de la bordure (*Boundary Approach*) qui consiste à modéliser la distribution gaussienne sur la population pour plusieurs paramètres, et de sélectionner les morphologies extrêmes situées sur l'ellipse formant la bordure de la distribution. L'idée est que si le poste de travail est adapté pour les morphologies extrêmes d'une population, celui-ci est adapté pour l'ensemble de la population. D'autres travaux proposent d'utiliser des modèles de régression pour générer de nouvelles morphologies à partir de bases de données existantes (BROLIN et al., 2017).

Enfin, la connaissance des capacités musculaires permet un meilleur dimensionnement des activités manuelles avec des charges lourdes. Cependant, les données de capacités musculaires (ou de couples articulaires) sont éparpillées dans la littérature. Il existe donc une difficulté à modéliser les capacités musculaires à travers une population, avec des valeurs cohérentes par



rapport aux paramètres anthropométriques. (WEISELL, 2002) introduit une approche pour estimer les couples articulaires maximaux en fonction de différents paramètres individuels (dimensions corporelles, position du corps, sexe, fatigue, etc.). L'approche se base sur des méthodes d'interpolation et de scaling pour compenser le manque de données expérimentales.

En simulation, il existe donc différentes approches pour modéliser des populations d'humains virtuels de morphologies différentes et possiblement représentatives de la population réelle. Pour évaluer l'adéquation d'un poste de travail, le simple modèle de l'humain n'est pas suffisant. L'humain virtuel doit être animé pour réaliser des activités avec, idéalement, des comportements optimisés par rapport à la morphologie.

### 2.3.3 Animation d'humains virtuels

Pour ces travaux, nous choisissons d'utiliser un modèle articulé (et donc simplifié) d'humain virtuel : dans le but de simuler une grande variété d'humains en temps interactif, le coût computationnel est un critère important. L'animation d'un modèle articulé présente des difficultés liées à la redondance élevée du corps humain. Après avoir introduit quelques principes liés à l'animation d'humains virtuels, les principales méthodes existantes basées sur la cinématique et sur la dynamique sont présentées.

#### 2.3.3.1 Principes d'animation

Pour animer un humain virtuel, les trajectoires de référence peuvent être capturées sur le travailleur effectuant l'activité ou être générées à partir de critères régissant le mouvement humain.

**Capture de mouvement** La capture de mouvement (ou *Motion capture*) sert à enregistrer les mouvements d'un humain réel effectuant une activité. Il existe plusieurs techniques de capture. Classiquement, les méthodes optiques se basent des marqueurs réfléchissant aux infrarouges attachés sur l'humain réel (p. ex. OptiTrack) pour suivre de manière précise ses mouvements. Cette approche est coûteuse et sensible aux occlusions. Les méthodes inertielles (p. ex. Xsens) se basent sur des accéléromètres attachés sur les segments du corps ; ces capteurs ne sont pas affectés par les occlusions, mais sont sensibles aux dérives temporelles et aux perturbations électromagnétiques. Plus récemment, des méthodes sans marqueurs et basées sur des flux vidéos permettent d'obtenir des estimations (moins précises) de la posture de l'humain (OpenPose). De plus, les avancées de le domaine de la réalité virtuelle a conduit au développement de méthodes de suivi de type *inside-out* : le casque est capable de localiser sa pose et celle des manettes par lui-même. Cette technique de suivi peut se faire avec marqueurs (Lighthouse HTC) ou sans marqueurs (Oculus Quest) grâce à des méthodes de SLAM (Simultaneous Localization And Mapping).

Dans notre cas, la capture de mouvement implique l'existence d'un prototype réel qui n'est généralement pas disponible dans un contexte de conception des postes de travail. L'utilisation de la capture de mouvement n'est cependant pas exclue : de nouvelles approches basées sur la réalité virtuelle permettent à un opérateur réel de réaliser des activités sur un poste de travail simulé (WEISTROFFER et al., 2022). Ce type d'approche est principalement limitée par la difficulté à obtenir un retour haptique précis, qui fait que les mouvements en réalité virtuelle sont différents de ceux effectués sur le poste de travail réel.

**Critères de génération** La redondance du corps humain fait qu'il existe généralement une infinité de solutions pour effectuer une activité donnée. Pour choisir une solution, il est nécessaire de définir un ou plusieurs critères, qui correspondent à ce qui est attendu du

comportement de l'humain virtuel. Notre objectif étant de simuler des humains virtuels sur des scénarios de postes de travail, le comportement doit être semblable à l'humain mais aussi ergonomique.

Pour générer des comportements similaires à l'humain, de nombreuses études se sont intéressées aux critères implicites que l'humain optimise durant ses mouvements. Dans les études sur le contrôle moteur chez l'humain, TODOROV et al. (1998) montrent que celui-ci a tendance à optimiser la régularité (*smoothness*) de son mouvement, ce qui correspond à minimiser le *jerk* (c.-à-d. la variation d'accélération), les couples articulaires ou les forces musculaires. IVALDI et al. (2012) montrent que ces principes d'optimalité du mouvement humain sont transférables sur des robots humanoïdes – et donc dans notre contexte pour des humains virtuels. Enfin, BERRET et al. (2019) utilisent du contrôle optimal inverse pour identifier précisément les critères (et leur importance relative) que l'humain optimise pour générer des mouvements observés. L'implémentation (ou l'identification) de ces critères pourrait servir à générer des comportements adaptés à différentes morphologies.

### 2.3.3.2 Approches basées sur la cinématique

Pour les approches cinématiques, l'animation de l'humain virtuel se fait par la configuration des positions et des vitesses articulaires.

**Clefs d'animation** La méthode par clefs d'animation (*keyframes*) est classiquement utilisée dans le domaine de l'animation pour donner vie à des personnages. L'animateur commence par créer une séquence de postures sur l'humain virtuel. L'animation est ensuite générée en faisant une interpolation du mouvement entre les clefs d'animations (postures) successives. Sur un modèle complexe tel que l'humain, configurer des postures pour produire des animations réalistes est un travail chronophage, en particulier si chaque angle articulaire doit être ajusté manuellement. De plus, si l'on veut itérer sur l'animation et ajuster les postures clefs, les postures doivent être de nouveau configurées.

**Cinématique inverse** Un des problèmes lié à l'animation d'humains virtuels est due à la redondance élevée du modèle causé par le nombre important de DDLs. Il existe en général une infinité de solutions dans l'espace articulaire, lorsque la main doit atteindre une pose précise dans l'espace cartésien.

Pour répondre à ce problème, les méthodes de cinématique inverse (IK) facilitent la mise en posture d'humains virtuels en travaillant dans l'espace cartésien au lieu de l'espace articulaire. Ces méthodes permettent de résoudre le problème de cinématique inverse, c.-à-d. calculer les positions (resp. vitesses) articulaires étant données des poses (resp. vitesses) cartésiennes de référence sur un ou plusieurs segments du corps. L'animateur n'a donc pas besoin de régler individuellement chaque angle articulaire. Il lui suffit d'ajuster la position et l'orientation de certains repères clefs du mannequin, typiquement l'extrémité des membres (pieds, mains, tête). Ces méthodes peuvent générer des animations à partir de trajectoires de référence sur les poses cartésiennes et aussi faciliter la création de clefs d'animation. Les références cartésiennes peuvent être définies à la main ou provenir de données de capture de mouvement.

Différentes approches ont été développées en cinématique inverse : les méthodes analytiques, numériques, heuristiques, basées données et hybrides (ARISTIDOU et al., 2018). Pour animer des humains, les méthodes heuristiques tel que CCD (Cyclic Coordinate Descent) (L.-C. WANG et al., 1991) et FABRIK (Forward and Backward Reaching Inverse Kinematics) (ARISTIDOU et al., 2011) sont généralement utilisées. Ces méthodes sont simples à implémenter et convergent rapidement vers une solution pour des chaînes articulées complexes. Ces

méthodes se basent sur des heuristiques pour successivement ajuster les angles articulaires jusqu'à convergence, mais sans prendre la globalité de la posture. Ainsi, ces approches peuvent converger vers des solutions valides, mais peu réalistes d'un point de vue physique et comportemental. Pour générer des animations plus réalistes, certaines approches introduisent des contraintes liées à la dynamique dans le problème d'optimisation. Certains logiciels récents intègrent ce type d'approches, pour l'animation des personnages de jeux vidéos (KHAPUGIN et al., 2019) ou des travailleurs virtuels (ABDEL-MALEK et al., 2019).

### 2.3.3.3 Approches basées sur la simulation physique

Dans cette partie, les méthodes d'animation basées sur la simulation physique sont présentées. La simulation physique reproduit les effets liés à la dynamique et aux collisions, ce qui garantit la cohérence des animations de vis-à-vis des lois de la physique. Dans un tel environnement, l'animation d'humains virtuels présente plusieurs difficultés, à savoir la gestion de la redondance élevée du système, de l'équilibre dynamique de l'humain et des interactions physiques avec l'environnement. Pour cela, les méthodes de contrôle utilisées en robotique humanoïde peuvent apporter des réponses au problème.

**Contrôle corps-complet** Un humain doit rester un équilibre et effectuer diverses tâches (suivre des trajectoires, garder une posture ergonomique, etc.) tout en ne dépassant pas les limites physiques (limites articulaires, etc.). Pour prendre en compte toutes ces tâches et contraintes de natures différentes, le contrôle QP (quadratic programming) est une méthode classique en robotique pour calculer rapidement la commande en couples articulaires.

Le contrôle QP est une méthode qui consiste à définir l'ensemble des tâches et des contraintes à respecter sous la forme d'un problème d'optimisation quadratique sous contraintes linéaires. Ce problème est résolu à chaque pas de temps pour calculer la commande optimale pour l'humanoïde (MORO et al., 2019). Le contrôle corps-complet basé QP présente plusieurs avantages. La résolution du problème QP est rapide avec une solution unique (si elle existe), lié au caractère purement réactif du contrôleur et à la convexité du problème d'optimisation. Cette méthode est destinée à fonctionner en temps réel sur des robots, ce qui rend son utilisation pertinente en simulation lorsque le coût de simulation doit être minimisé. Un autre avantage est la versatilité et la configurabilité de la méthode : des tâches et des contraintes peuvent être ajoutées et modifiées à la volée dans la formulation du problème.

Avec un contrôleur QP, une question est de savoir comment gérer la priorité entre les différentes tâches et contraintes, c.-à-d. l'importance relative donnée à chacune d'elle. D'une part, les approches hiérarchiques permettent de définir une priorité stricte entre les contraintes (ESCANDE et al., 2014). Classiquement, la résolution du problème peut se faire par la projection de chaque contrainte dans le noyau de celle de priorité supérieure (SICILIANO et al., 1991) ou par une résolution en cascade de problème QP (KANOUN et al., 2011). D'autre part, les approches pondérées permettent de définir une priorité relative entre les tâches, en associant à chaque tâche un poids (SALINI et al., 2011) qui peut être ajusté selon le comportement voulu sur l'humain virtuel.

La principale limitation réside dans le fait qu'un contrôleur QP reste un contrôleur bas-niveau et purement réactif. Tel quel, ce contrôleur ne peut pas générer des comportements hautement dynamiques qui requièrent des méthodes de planification. De plus, il est nécessaire de fournir les trajectoires de références utilisées par les tâches et les contraintes. Pour générer des comportements complexes capables de tirer partie de l'environnement, des méthodes de

planification plus haut-niveau (p. ex. contrôle optimal) permettent de calculer des trajectoires ou des séquences de contact valides (MORDATCH et al., 2012) (TONNEAU et al., 2018) sur un horizon de temps plus lointain.

**Contrôle prédictif** La commande prédictive (ou MPC pour *Model Predictive Control*) est une approche classique en contrôle de procédés industriels, appliquée plus récemment au contrôle de robots humanoïdes (TASSA et al., 2012). Les travaux récents se sont focalisés sur la réduction du coût computationnel élevé de ce type d'approche, pour en permettre le fonctionnement en temps réel sur de tels robots (KOENEMANN et al., 2015). Un autre enjeu consiste à pouvoir générer des comportements complexes où le robot peut librement s'aider des contacts avec l'environnement pour réaliser sa tâche. L'approche multi-contact est décrite plus en détails dans BOUYARMANE et al. (2019) pour générer et calculer la commande permettant au robot humanoïde de faire des mouvements impliquant des séquences de contacts arbitraires. Des efforts sont investis dans des implémentations libres comme Crocodyl (MASTALLI et al., 2020) pour rendre les travaux récents du domaine accessibles et non-spécifiques à une plateforme robotique précise.

**Apprentissage par renforcement** Depuis quelques années, l'apprentissage par renforcement profond apparaît comme une approche prometteuse pour contrôler des humains virtuels en simulation physique. Dans les travaux pionniers de PENG et al. (2018), l'humain virtuel est capable de rejouer des mouvements hautement dynamiques (salto, coups de pieds, etc.) ; l'apprentissage par renforcement profond est utilisé pour entraîner une politique de contrôle en couple, avec seulement des données cinématiques en entrée et sans modèle dynamique de l'humain. Divers travaux ont cherché à étendre les fonctionnalités et améliorer les performances de l'approche. WON et al. (2022) présentent un contrôleur pouvant s'adapter en temps réel à des modifications morphologiques sur l'humain pour des activités de locomotion ; des paramètres morphologiques sont utilisés dans le vecteur d'état en entrée de la politique. Jusqu'ici, les contrôleurs sont peu configurables par l'utilisateur et se contentent de reproduire un mouvement de référence. Dans les travaux de BERGAMIN et al. (2019), le contrôleur peut prendre en entrée la direction à suivre par le personnage physique, ce qui ouvre la voie à de la locomotion dynamique et interactive. Pour réduire le coût d'entraînement, des travaux proposent des architectures permettant de généraliser une politique de contrôle à plusieurs mouvements différents, à partir d'un mouvement de référence (S. LEE, 2021) ou d'une base de données entière de mouvements (T. WANG et al., 2020).

**Conclusion sur les approches dynamiques** Les principales approches pour animer un humain virtuel articulé en simulation physique ont été présentées. Chaque approche possède des avantages et des inconvénients.

- Un contrôleur corps-complet QP est rapide mais purement réactif.
- Un contrôleur prédictif permet de planifier la commande, au prix d'une optimisation coûteuse.
- L'apprentissage par renforcement profond permet de reproduire des comportements hautement dynamiques, au prix d'un entraînement coûteux et d'une configurabilité limitée du contrôleur.

Encore une fois, le coût en calcul est un critère important car l'objectif est de simuler des activités pour de nombreuses morphologies différentes. Pour les travaux de thèse, le choix de la méthode s'est donc porté sur le contrôle corps-complet à base de programmation quadratique.

### 2.3.3.4 Animations morpho-spécifiques

Nous venons de voir les principales approches pour modéliser différentes morphologies d'humain et pour les animer. Cependant, il n'est pas garanti que l'animation produite soit morpho-spécifique (c.-à-d. adaptée à la morphologie) et corresponde à ce que ferait idéalement l'humain réel. Avec la redondance importante du corps humain, il existe en général une infinité de mouvements pour effectuer une activité donnée. Plus largement, si les interactions avec l'environnement sont prise en compte, il existerait une infinité de stratégies d'exécution pour réaliser l'objectif liée à l'activité.

Pour produire des animations morpho-spécifiques, plusieurs questions se posent. Tout d'abord, en quoi consiste une animation adaptée à la morphologie ? Quelles sont les méthodes existantes pour générer des animations adaptées à une morphologie cible ? La suite de la présentation s'articule autour de deux approches identifiées dans la littérature : le transfert d'animation et la génération d'animation.

**Transfert d'animation** En transfert d'animation (ou *retargeting*), l'objectif est de reproduire un mouvement de référence d'un humain sur d'autres humains de morphologies diverses. L'humain est donc considéré comme la référence à suivre ; typiquement, ses mouvements sont récupérés à l'aide des dispositifs de capture de mouvements. Cette approche est très répandue dans le domaine de l'animation, pour transférer les mouvements d'acteurs sur des personnages de films ou de jeux vidéos (GLEICHER, 1998). Cette approche est aussi utilisée en robotique, pour faire de la télé-opération de robots (PENCO et al., 2018) ou pour générer des mouvements similaires à l'humain sur des robots sociaux (KIM et al., 2006). En ergonomie des postes de travail, il s'agit plutôt d'obtenir des comportements qui soient cohérents par rapport aux capacités physiques du travailleur.

Dans les **approches posturales**, la méthode la plus directe en transfert d'animation consiste à reproduire les angles articulaires à l'identique sur la morphologie cible. Cependant, cette approche est très vite limitée et ne permet pas de produire des animations adaptées, dès lors que la structure cinématique entre la morphologie de référence et la morphologie cible sont différentes. Sur les approches posturales, le principal problème consiste à trouver une correspondance adaptée entre la référence et les cibles potentielles et qui permet de prendre en compte les différences liées à la morphologie (p. ex. nombre de DDLs, longueurs des segments distincts). Dans le domaine de l'animation, de nombreux travaux se sont intéressés au problème de transfert d'animation sur des morphologies distinctes de celle de référence. ABDUL-MASSIH et al. (2017) présentent une méthode pour identifier et transférer le style d'une animation de référence existante, sur des morphologies très différentes (par exemple, d'un humain vers une hydre à trois têtes). Cependant, ce type d'approche est purement graphique et ne permet pas de prendre en compte des contraintes liées à la physique et utiles en analyse ergonomique. Dans le domaine de la robotique, le transfert d'animation consiste à transférer les mouvements de l'humain sur des robots réels qui ont nécessairement une morphologie différente de l'humain. Sur des robots, les contraintes physiques doivent être prises en compte, pour gérer les contacts avec l'environnement, l'équilibre dynamique du robot et les auto-collisions. PENCO et al. (2018) redirigent les mouvements de l'humain sur un robot humanoïde (iCub) dont la morphologie est distincte de l'opérateur et se rapproche de celle d'un enfant. La correspondance dans l'espace articulaire est définie manuellement, entre la structure cinématique de l'humain (issue du mannequin virtuel Xsens) et celle de l'iCub. CHOI et al. (2020) automatisent l'obtention d'une correspondance dans l'espace articulaire grâce à des méthodes d'apprentissage. À partir de données expérimentales, la correspondance est modélisée dans un espace latent avec un auto-encodeur. Pour transférer une posture en



entrée, les  $k$  plus proches voisins sont sélectionnés dans l'espace latent et une régression est effectuée dans l'espace articulaire correspondant. Cette méthode permet de transférer le mouvement de l'humain vers différentes morphologies de robots, sans avoir à définir à la main la correspondance. Enfin, avec la simulation physique et l'apprentissage profond, il est devenu possible de transférer des mouvements plus complexes d'un point de vue dynamique et sur différentes morphologies. WON et al. (2022) utilisent l'apprentissage par renforcement profond pour transférer des mouvements de locomotion sur une continuité de morphologies d'humains. Après un entraînement (coûteux), la politique d'action infère les couples articulaires avec en entrée un nombre limité de paramètres morphologiques sélectionnés (p. ex. proportions du corps, répartitions des masses). Le mouvement de référence peut être rejoué sur des humains virtuels dont les caractéristiques morphologiques peuvent être modifiées en temps réel.

Cependant, dans des activités industrielles, l'humain doit en général atteindre des cibles dans l'espace de travail, et pas nécessairement rejouer un mouvement de référence en particulier. Les approches posturales présentées ci-dessus ne permettent pas de gérer toutes les animations, en particulier dans les phases d'une activité où l'humain doit atteindre des cibles précises dans son espace de travail.

Dans les **approches cartésiennes**, le transfert de l'animation se fait dans l'espace cartésien, à travers des trajectoires ou des poses cartésiennes de références. En animation, les méthodes basées sur la cinématique inverse sont classiquement utilisées pour résoudre ce problème. GLEICHER (1998) présentent une méthode de transfert de mouvements pour des personnages en 2D. La cinématique inverse est utile pour garantir certaines contraintes cinématiques (p. ex. pieds au sol), mais ne suffit pas en tant que tel pour garantir la continuité du mouvement dans le temps : un algorithme d'IK peut potentiellement générer des postures différentes entre deux *frames* d'animation consécutives. Une étape d'optimisation supplémentaire est alors nécessaire pour garantir la cohérence temporelle du mouvement. HECKER et al. (2008) présentent une méthode générique et en temps réel pour transférer des trajectoires cartésiennes de référence sur n'importe quelle morphologie de personnages. Les auteurs prennent en considération différents modes de transfert liés aux approches cartésiennes, avec une distinction entre le mode absolu (pas de correspondance sur les poses de référence) et les modes relatifs (ajout d'un *offset* par rapport à un repère parent par exemple). En robotique, à cause des contraintes physiques, il est nécessaire d'utiliser un contrôleur capable de prendre en compte des tâches cartésiennes (p. ex. les contrôleurs corps-complet). (DARVISH et al., 2019) rejouent le mouvement de l'humain sur différentes morphologies de robots. Dans l'espace cartésien, les repères cartésiens de l'humain et du robot qui correspondent doivent être définis de manière pertinente (typiquement sur les repères cartésiens de l'épaule et des pieds/mains). Enfin, dans le domaine de l'ergonomie, des méthodes similaires basées sur du contrôle corps-complet ont été utilisées (DE MAGISTRIS et al., 2013; MAURICE et al., 2017) pour transférer les mouvements d'un opérateur réel sur un modèle d'humain virtuel. Bien que le but de ces travaux consiste à rejouer le mouvement sur une morphologie « identique », il existe une différence de domaine entre l'humain réel et le modèle d'humain simplifié en simulation.

Les approches de transfert présentent plusieurs limites notables pour générer des animations morpho-spécifiques. Dans ces approches, une hypothèse centrale est de considérer l'humain comme une référence à suivre. Cependant, rien ne garantit que l'humain réel effectue la tâche correctement et de manière ergonomique, ce qui peut ensuite fausser les animations subséquentes et transférées sur d'autres morphologies. De plus, ces approches nécessitent de capturer au préalable les mouvements de l'humain, ce qui n'est pas forcément possible dans un contexte de conception des postes de travail. Enfin, les méthodes présentées permettent

d'adapter le mouvement à d'autres morphologies et considérant seulement le problème du mappage cinématique/cartésien. Pour réellement adapter le mouvement (et plus largement le comportement) à différentes morphologies dans notre contexte, d'autres aspects doivent être considérés, en particulier l'optimalité du mouvement par rapport à des critères de performances ou d'ergonomie.

**Optimisation d'invariants en morphologie** Dans cette partie, l'idée est plutôt de générer des comportements adaptés à la morphologie par l'optimisation de critères adaptés.

Tout d'abord, les critères « invariant » par rapport à la morphologie de l'humain doivent être identifiés, c.-à-d. ceux qui restent identiques quelle que soit la morphologie considérée. En optimisant ces critères, nous supposons que chaque morphologie exploite la redondance chez l'humain pour trouver des comportements morpho-spécifiques. Ces critères sont typiquement liés :

- **à l'activité.** Toutes les morphologies doivent accomplir l'activité. Il s'agit alors de définir clairement ce qui caractérise l'activité : une trajectoire cartésienne, une cible à atteindre, une force à exercer, etc. Dans ce cas, si l'activité est définie par une trajectoire, l'optimisation peut adapter les trajectoires sur le reste du corps en fonction de la morphologie. Si l'activité est seulement définie par une cible à atteindre, la trajectoire intermédiaire (entre le point de départ et la cible) est aussi potentiellement adaptable en fonction de la morphologie.
- **à l'ergonomie,** en supposant que tous les humains cherchent à minimiser le risque de développer des TMS. Les indicateurs présentés plus tôt ([sous-section 2.2.3](#)) peuvent être utilisés comme critère d'optimisation.
- **à la similarité avec l'humain** d'un point de vue comportemental, si cet aspect est considéré comme pertinent.

Sur un poste de travail, une hypothèse raisonnable consiste à dire que l'humain cherche à optimiser prioritairement la réalisation de l'activité, avant l'ergonomie (c.-à-d. des mouvements minimisant le risque de TMS). Cependant, ces deux critères dépendent de nombreux autres critères. Par exemple, la performance peut dépendre de la rapidité d'exécution ou de la précision du mouvement de l'humain. L'ergonomie est plus difficile à caractériser et peut dépendre de critères liés à la posture, aux efforts internes, etc. De plus, il faut en général faire un compromis entre les différents critères mentionnés. GOMES et al. (2022) présentent une méthode basée sur un algorithme d'optimisation multi-objectif, pour optimiser les mouvements de l'humain par rapport à des indicateurs ergonomiques (RULA, angle du dos, etc.). Cette approche est appliquée pour plusieurs morphologies et génère des comportements optimisés en termes d'ergonomie pour chacune d'elles.

## 2.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons fait une revue des principaux facteurs de risque physiques en ergonomie des postes de travail, avec une attention particulière sur les facteurs de risque liés à la morphologie des travailleurs. De nombreuses études épidémiologiques montrent que les caractéristiques morphologiques ont une influence significative sur le risque ergonomique et justifient que ces facteurs doivent être pris en compte dans l'analyse ergonomique. En pratique, les outils standards utilisés par l'ergonome (normes, indicateurs ergonomiques) prennent en compte les facteurs de risque liés à l'activité (postures extrêmes, répétitions,

etc.) mais pas directement les facteurs morphologiques. Avec la simulation d'humains virtuels, il est possible de modéliser une variété de morphologies d'humains représentatifs de la population. Pour animer ces humains virtuels, il existe différentes approches issues de la robotique et de l'animation.

Dans le cadre de la thèse, le choix s'est porté sur un modèle articulé d'humain et un contrôleur corps-complet en simulation physique, principalement pour le coût computationnel réduit qui facilite la mise à échelle sur une grande population d'humains. Pour générer des comportements adaptés à chaque morphologie, deux approches sont présentées : le transfert d'animation et l'optimisation d'invariants. La deuxième approche est la plus prometteuse pour générer des comportements morpho-spécifiques, par l'optimisation de critères indépendants de la morphologie, notamment liés à la réalisation de l'activité et l'ergonomie.

Le chapitre suivant décrit plus en détails les outils utilisés pour ces travaux pour simuler des humains virtuels ([chapitre 3](#)), à savoir le simulateur physique et le contrôleur corps-complet.



## Chapitre 3

# Simulation physique et interactive d’humains virtuels

### Sommaire

---

<b>3.1</b>	<b>Introduction</b>	<b>35</b>
<b>3.2</b>	<b>Simulateur d’humains virtuels</b>	<b>36</b>
3.2.1	Plateforme de simulation XDE	36
3.2.2	Humain virtuel XDE	38
<b>3.3</b>	<b>Contrôle corps-complet</b>	<b>39</b>
3.3.1	Formulation du problème QP	40
3.3.2	Tâches QP	41
3.3.3	Contraintes QP	43
<b>3.4</b>	<b>Interfaçage entre physique et contrôle</b>	<b>46</b>
3.4.1	Fonctionnement général	46
3.4.2	Architecture du composant <code>xde::control::tsid</code>	47
<b>3.5</b>	<b>Conclusion</b>	<b>49</b>

---

### 3.1 Introduction

L’objectif de la thèse est de développer de nouvelles outils l’ergonomie des postes de travail permettant de prendre en compte la variabilité morphologique des travailleurs. En conception de postes de travail, il existe une multitude d’outils de simulation d’humains virtuels pour analyser le risque ergonomique pour une diversité de morphologies d’humains ([sous-section 2.3.3](#)). Cependant, les outils de simulation (basés sur les approches d’animation cinématiques) produisent en général des comportements stéréotypés, provenant de mouvements pré-enregistrés ou de la cinématique inverse. Ces approches ont une prise en compte limitée des phénomènes liés à la physique et des spécificités liées à la morphologie de l’individu.

Pour simuler des humains sur des postes de travail virtuels, une approche émergente consiste à utiliser la simulation physique (MAURICE et al., 2017). La simulation physique permet de garantir le réalisme physique des mouvements de l’humain virtuel, par la prise en compte des effets liés à la dynamique et aux collisions. Ici, le réalisme physique correspond donc au respect des lois de la physique, et non nécessairement au réalisme d’un point de vue comportemental (c.-à-d. ce que ferait un humain réel). Cependant, par rapport à des

approches purement cinématiques, l'utilisation d'une simulation physique implique un coût computationnel plus élevé, pour résoudre la dynamique du système simulé et pour contrôler l'humain virtuel.

Étudier l'ergonomie d'un poste de travail pour une grande variété de morphologies implique de potentiellement effectuer de nombreuses simulations. Pour réduire la complexité de la simulation, le choix d'un modèle articulé a été fait pour l'humain virtuel (sous-section 2.3.2). Pour calculer en temps interactif la commande en couples de l'humain articulé, un contrôleur corps-complet basé sur l'optimisation quadratique a été choisi (sous-section 2.3.3).

La suite du chapitre donne plus de détails sur les choix techniques effectués pour simuler des humains virtuels sur des postes de travail industriels. D'une part, la simulation physique permet de gérer les phénomènes physiques (forces, collisions, etc.) des objets de la simulation, c'est-à-dire l'humain virtuel et son poste de travail (section 3.2). D'autre part, le contrôleur corps-complet QP récupère l'état de la simulation physique et calcule la commande en couples articulaires de l'humain virtuel (section 3.3). Enfin, nous présentons l'interfaçage entre le contrôleur QP et la simulation physique implémentée dans le cadre de la thèse (section 3.4). La figure 3.1 donne une vue d'ensemble de l'architecture de simulation utilisée dans ces travaux.

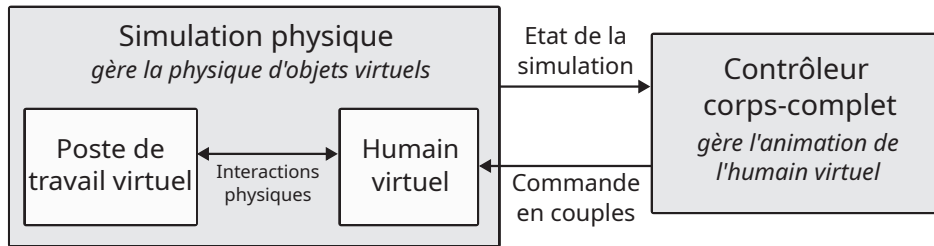


FIGURE 3.1 – Vue d'ensemble de l'approche présentée dans ce chapitre et basée sur les travaux de (MAURICE et al., 2017), pour générer des comportements physiquement réalistes et en temps interactif sur l'humain virtuel.

## 3.2 Simulateur d'humains virtuels

### 3.2.1 Plateforme de simulation XDE

La plateforme XDE (eXtended Dynamics Engine) est un simulateur physique basé sur le moteur physique du même nom et développé par le Laboratoire de Simulation Interactive au CEA-LIST (MERLHIOT et al., 2012). Le projet de thèse est co-encadré et financé par le CEA-LIST, ce qui motive le choix de XDE pour la simulation physique. En outre, le simulateur physique XDE dispose de nombreuses fonctionnalités pour faciliter la simulation d'activités sur des postes de travail virtuels et pour différentes morphologies d'humains.

#### 3.2.1.1 Moteur physique XDE

Le moteur physique d'XDE permet de simuler la dynamique de corps rigides avec une définition explicite de la structure cinématique de robots ou d'humains virtuels. Cela garantit le respect des contraintes liées aux liaisons cinématiques et des erreurs faibles sur l'estimation des grandeurs dynamiques du système. De plus, le moteur physique permet de simuler avec précision les collisions et les effets de frictions entre des corps rigides. Cela permet une estimation précise des points de contact et plus largement une simulation réaliste des interactions

entre l'humain virtuel et son environnement. Enfin, le moteur XDE possède une intégration physique rapide (inférieur au temps interactif) même lorsque de nombreux solides rigides sont instanciés. Cela ouvre la voie à des applications interactives en temps réel ou nécessitant des nombreuses simulations.

Le moteur physique est intégré à une architecture client-serveur XDE Simple Middleware (XSM) qui facilite la création d'applications basées sur XDE et qui en étend les fonctionnalités. Côté serveur, le moteur physique effectue l'ensemble des calculs liés à la physique du système simulé. Côté client, l'utilisateur dispose d'une interface d'édition sous Unity lui permettant de configurer et d'interagir en temps réel avec la scène physique. Cette architecture permet un découplage entre la boucle de simulation physique fonctionnant à une fréquence plus élevée et fixe, et la boucle client qui fonctionne à plus basse fréquence et qui gère des appels asynchrones liés aux interactions avec l'utilisateur.

### 3.2.1.2 Interface d'édition Unity

Unity est à l'origine un moteur de jeux vidéos, mais dont l'utilisation a été étendue à l'industrie, pour des applications en 3D voire en immersion (visualisation de maquettes numériques, prototypage virtuel, etc.). Dans un contexte de simulation de postes de travail, le logiciel d'édition Unity présente des fonctionnalités intéressantes :

- Une **interface d'édition graphique** qui facilite la visualisation en 3D des postes de travail et de l'humain virtuel durant le processus de création. De plus, la création de postes de travail est accessible à des non-experts grâce aux éléments de développement sans programmation (*no-code*), via les objets Unity (*Unity GameObjects*) ou les outils de scripting visuels.
- La **versatilité et la modularité** du logiciel. Le système de modules d'Unity permet d'importer facilement de nouvelles fonctionnalités ou des éléments graphiques dans la scène virtuelle. En l'occurrence, le simulateur physique XDE constitue en lui-même un ensemble de modules à importer dans l'éditeur Unity. Le logiciel dispose d'un système de scripting (en C#) pour créer des comportements (à travers la classe *MonoBehaviors*) permettant de manipuler les propriétés des objets Unity ou l'interface d'édition elle-même.
- L'**intégration avec divers périphériques** : casques de réalité virtuelle via le module SteamVR, dispositifs de capture de mouvement (ART, Xsens, ZED, Kinect, etc.).
- La **création d'application autonomes** et multiplateformes, ce qui facilite le partage et le déploiement d'applications basées sur XDE.

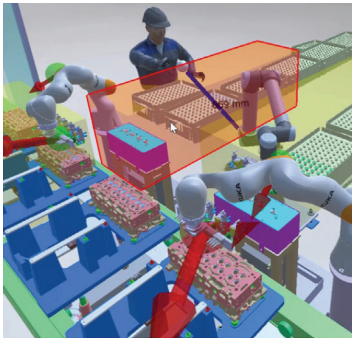
### 3.2.1.3 Création de postes de travail

Avec l'éditeur Unity, la création d'un poste de travail dans la simulation physique XDE se fait typiquement en suivant les étapes suivantes :

1. Importer dans l'éditeur le module XDE et les modules additionnels liés à l'humain virtuel et à son contrôle. L'utilisateur peut configurer une scène physique et des humains virtuels instanciés côté serveur à travers les objets Unity fournis par ces modules.
2. Ajouter et configurer les objets physiques de la scène (*RigidBody*). Les objets physiques sont en général associé à une géométrie de collision (*MeshCollider*). Ce volume peut être défini à partir de formes primitives (sphères, cylindres, etc.) ou de modèles 3D importés.

3. Implémenter des comportements et des interactions entre les objets de l'environnement (incluant l'humain virtuel) ou avec l'utilisateur. Les comportements modifiant des éléments graphiques ou liés à des interactions utilisateurs sont implémentés côté éditeur Unity en C#. Les comportements qui agissent sur les propriétés physiques du système ou qui doivent suivre la fréquence du moteur physique sont implémentés côté serveur en C++.

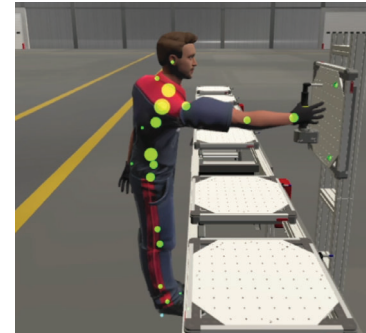
L'interface d'édition permet donc de configurer rapidement différents postes de travail et morphologies d'humains, qui sont ensuite simulés dans le moteur physique XDE. La [figure 3.2](#) donne quelques exemples de postes de travail virtuels créés avec la plateforme de simulation.



(a) Jumeau numérique d'un poste de travail et de l'opérateur réel, issue du projet SEEROB (WEISTROFFER et al., 2022).



(b) Mise en posture d'un humain virtuel en réalité virtuelle ([chapitre 4](#))



(c) Simulation d'une tâche de vis-à-vis sur une chaîne d'assemblage ([chapitre 5](#))

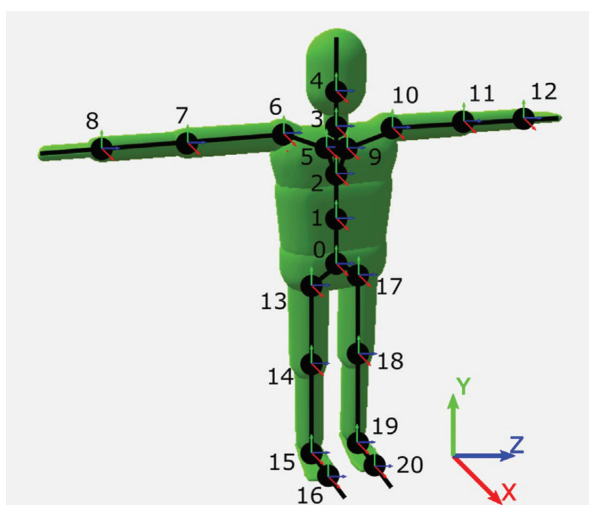
FIGURE 3.2 – Exemples de postes de travail créés avec XDE. Les deux images de droite correspondent à des postes de travail virtuel conçus dans le cadre de la thèse.

### 3.2.2 Humain virtuel XDE

L'humain virtuel implémenté dans XDE (WEISTROFFER et al., 2022) dispose de 47 degrés de liberté (DDL) actionnés et de 6 DDLs non actionnés liés à la base flottante centrée sur le repère du bassin. Chaque DDL actionné est une liaison pivot. Pour les articulations à plusieurs DDLs, les liaisons pivots sont colocalisées et reliées entre elles par des corps virtuels (c.-à-d. sans masse et sans géométrie de collision). La [figure 3.3](#) montre la chaîne cinématique complète de l'humain virtuel, ainsi que les DDLs pour chacune des articulations.

Les dimensions anthropométriques de l'humain virtuel sont entièrement reconfigurables. Pour générer rapidement différentes morphologies, l'utilisateur peut simplement spécifier la taille et le poids total de l'individu. Les dimensions corporelles et la distribution des masses sont ensuite calculées à partir des travaux de DRILLIS et al. (1964) (pour les longueurs des segments) et de ZATSIORSKY et al. (1979) (pour la masse de chaque segment). Les dimensions anthropométriques d'un humain réel peuvent être importés à partir de mesures corporelles en capture de mouvement (OpenPose).

Les données liées à la morphologie de l'humain peuvent être exportées (ou importées) dans le format URDF (Unified Robot Description File), format classique utilisé en robotique pour spécifier le modèle d'un robot. Dans le cadre de la thèse, ce format permet aussi de décrire précisément l'ensemble des caractéristiques morphologiques de l'humain : les dimensions des segments du corps, la répartition des masses, les limites articulaires en position, en vitesse et en couples.



(a) Chaîne cinématique et géométrie de collision de l'humain virtuel XDE (WEISTROFFER et al., 2022), avec les repères orthonormés liés à chaque DDL. L'humain virtuel est en T-pose par défaut (quand les positions articulaires sont nulles).

N°	Nom	DDL
0	Pelvis	6
1	Lombaire (L5)	XZY
2	Thoracique (T4)	XZY
3	Cou	XZY
4	Tête	XZ
5/9	Clavicule G/D	$\bar{X}\bar{Y}$
6/10	Epaule G/D	XYZ
7/11	Avant-bras G/D	YZ
8/12	Main G/D	XYZ
13/17	Hanche G/D	$\bar{X}\bar{Z}\bar{Y}$
14/18	Genou G/D	ZY
15/19	Cheville G/D	XZ
16/20	Orteil G/D	Z

(b) Degrés de liberté de l'humain virtuel XDE.

FIGURE 3.3 – Structure cinématique et géométrie de collision de l'humain virtuel XDE

Les volumes de collision (figure 3.3a) sont définis à partir de segments et de plans dilatés correspondant aux dimensions anthropométriques de l'humain virtuel. Pour chaque volume, le rayon de dilation augmente avec la masse du segment du corps correspondant. La géométrie de collision s'adapte donc en fonction de la morphologie de l'humain. Cette méthode basée sur des formes géométriques simples permet aussi une détection rapide des collisions entre l'humain virtuel et les objets physiques du poste de travail virtuel.

L'animation de l'humain virtuel XDE peut être réalisée de plusieurs manières. Pour une animation basée sur la cinématique, les vecteurs de positions  $\mathbf{q}$  ou de vitesses articulaires  $\nu$  généralisées peuvent être fournis en entrée à l'interface de contrôle de l'humain virtuel (`xde::control::Model`). Pour une animation basée sur la dynamique, les couples d'actionnement  $\tau$  peuvent être fournis à l'humain virtuel. Quelques modes de commande sont déjà intégrés : le contrôle proportionnel-dérivé (PD) en cartésien et le contrôle PD en articulaire. Ces méthodes permettant d'avoir une continuité temporelle sur les animations et de gérer les collisions physiques entre l'humain virtuel et le poste de travail. Cependant, l'équilibre dynamique de l'humain n'est pas géré par ces méthodes.

### 3.3 Contrôle corps-complet

Pour animer l'humain virtuel XDE en simulation physique, un contrôleur corps-complet QP est utilisé pour calculer la commande en couples articulaires à chaque pas de temps. Le contrôleur se base sur l'approche pondérée des tâches (en opposition aux approches hiérarchiques) introduite dans les travaux de SALINI et al. (2011). L'approche pondérée permet un paramétrage continu de la priorité relative entre les tâches définies dans contrôleur. Les tâches sont de natures différentes et ne sont pas normalisées : deux tâches avec un poids identique n'auront pas forcément une importance comparable. Des poids très différents (c.-à-d. plusieurs ordres de grandeur) peuvent tout de même être attribués pour établir une hiérarchie souple entre les tâches.

Le contrôleur corps-complet implémenté pour la thèse se base sur la bibliothèque TSID développée par le LAAS-CNRS et issue des travaux de DEL PRETE et al. (2016). TSID fournit une API (interface de programmation) pour modéliser des tâches et des contraintes, pour formuler le problème QP et le résoudre. La bibliothèque est activement utilisée dans la communauté en robotique humanoïde et est disponible en open source (<https://github.com/stack-of-tasks/tsid>); l'architecture modulaire de la bibliothèque facilite l'implémentation de nouvelles tâches et contraintes. La bibliothèque se base sur Pinocchio (CARPENTIER et al., 2019) pour la modélisation dynamique de systèmes articulés et sur le solveur Eiquadprog pour la résolution du problème QP basée sur les travaux de GOLDFARB et al. (1983).

La suite de la section décrit brièvement la formulation mathématique du problème QP et donne des détails d'implémentation spécifiquement liés aux travaux de thèse.

### 3.3.1 Formulation du problème QP

Le but du contrôleur est de calculer les couples articulaires permettant à l'humain virtuel d'effectuer simultanément plusieurs tâches (rester en équilibre, suivre des trajectoires, etc.) tout en respectant des contraintes (équation de la dynamique, contacts non glissants, capacités physiques de l'humain, etc.). Ce problème de contrôle est posé comme un problème d'optimisation quadratique sous contraintes linéaires. La fonction objectif à minimiser s'écrit comme une somme pondérée de termes quadratiques, où chaque terme correspond à une tâche.

La formulation générale du problème QP est la suivante :

$$\arg \min_{\chi=(\tau, \dot{\nu}, f_c)} \sum_{i=1}^{n_{\text{task}}} w_i \|A_i \chi - a_i\|^2 \quad (3.1a)$$

$$\text{s.t.} \quad C_{in} \chi \leq c_{in} \quad (3.1b)$$

$$C_{eq} \chi = c_{eq} \quad (3.1c)$$

$$M(\mathbf{q})\dot{\nu} + h(\mathbf{q}, \nu) = S\tau + \sum_{k=1}^{n_{\text{contact}}} J_{c_k}^T(\mathbf{q})f_{c_k} \quad (3.1d)$$

avec :

- les **variables d'optimisation**  $\chi = (\tau, \dot{\nu}, f_c)$ , avec  $\dot{\nu}$  les accélérations généralisées (c'est-à-dire les accélérations de la base flottante et articulaires) et  $f_c$  les forces de contacts. Un contact est défini par un ou plusieurs points de contact (auquel cas, le contact devient linéaire ou surfacique).  $f_c$  est donc un vecteur de dimension  $\mathbb{R}^{3 \times n_c}$  où  $n_c$  est le nombre de points de contact entre l'humain virtuel et l'environnement.
- les **tâches QP** au sein de la fonction de coût (équation 3.1a). Chaque tâche correspond à une erreur à minimiser par rapport à une force ou une accélération de référence, pouvant être définie dans l'espace cartésien ou articulaire. Dans l'expression générale, les tenseurs  $(A_i, a_i)$  servent à exprimer la tâche en fonction des variables d'optimisation  $\chi$ .  $w_i$  définit le poids de la tâche d'indice  $i$  parmi les  $n_{\text{task}}$  tâches dans la fonction de coût.
- les **contraintes QP** qui doivent être respectées par la solution  $\chi$ , telles que les contraintes de non-glissement au niveau des contacts ou les contraintes articulaires qui modélisent les limites biomécaniques du corps humain. Les contraintes sont linéaires, avec les tenseurs  $(C_{eq}, c_{eq})$  et  $(C_{in}, c_{in})$  exprimant respectivement les contraintes d'égalités et d'inégalités du problème.



- **l'équation de la dynamique** qui permet de garantir la réalisme physique de la solution (équation 3.1d), où  $M$  est la matrice de masse du système,  $\nu$  est le vecteur de vitesses généralisées.  $\mathbf{q} = (X_{\text{root}}, q)$  est le vecteur des coordonnées généralisées, avec  $X_{\text{root}}$  la pose cartésienne de la base flottante et  $q$  la configuration articulaire.  $h$  regroupe les termes liés à la gravité et aux forces de Coriolis et centrifuge et  $S$  est une matrice de sélection pour éliminer les DDLs non actionnables (c.-à-d. les DDLs de la base flottante).  $f_{c_k}$  est le vecteur des forces de contact appliqués sur le  $k^{\text{ième}}$  contact avec  $J_{c_k}$  la matrice Jacobienne correspondante. Lorsqu'un contact comporte plusieurs points de contact, le torseur d'actions équivalent  $w_i^k$  peut être calculé.

Ce problème est résolu à chaque pas de temps de simulation pour calculer la commande en couple  $\tau$  de l'humain virtuel. Dans l'implémentation de TSID, le nombre de variables d'optimisation est réduit à  $\chi = (\dot{\nu}, f_c)$ , en exploitant le fait que  $\tau$  peut s'exprimer en fonction de  $\dot{\nu}$  et  $f_c$  dans l'équation de la dynamique (équation 3.1d).

### 3.3.2 Tâches QP

Dans l'équation 3.1, la forme générique d'une tâche QP est donnée. Une tâche QP peut s'exprimer dans différents espaces, qui peuvent se réexprimer en fonction des variables d'optimisation  $\chi$  (SALINI et al., 2011).

- dans l'espace des accélérations articulaires  $\ddot{q}$  :

$$\|\ddot{q} - \ddot{q}^*\|^2 = \|S\dot{\nu} - \ddot{q}^*\|^2 \quad (3.2)$$

avec  $\ddot{q}^*$  l'accélération articulaire désirée.

- dans l'espace opérationnel ou cartésien :

$$\|\ddot{X}_i - \ddot{X}_i^*\|^2 = \|J_i\dot{\nu} + \dot{J}_i\nu - \ddot{X}_i^*\|^2 \quad (3.3)$$

avec pour un repère  $i$ ,  $X_i$  la pose cartésienne courante et  $X_i^*$  celle désirée.

- dans l'espace des couples articulaires :

$$\|\tau - \tau^*\|^2 \quad (3.4)$$

Les variables d'optimisations  $(\dot{\nu}, f_c)$  réapparaissent en introduisant les équations de la dynamique (équation 3.1d).

- dans l'espace des torseurs d'efforts :

$$\|w_k - w_k^*\|^2 = \|F_g f_{c_k} - w_k^*\|^2 \quad (3.5)$$

avec  $w_k$  le torseur d'effort associé au contact  $k$ . La variable d'optimisation  $f_{c_k}$  (forces de contact) réapparaît, en considérant une matrice  $F_g$  qui donne le torseur d'effort équivalent exercé par les forces de contact ponctuels  $f_{c_k}$ .

Le reste de la section donne plus de détails quant aux tâches et aux contraintes utilisées pour contrôler l'humain virtuel. La section ne donne pas une description exhaustive des formulations, mais en donne les principaux éléments afin de comprendre l'approche utilisée.

### 3.3.2.1 Tâche Cartésienne

Une tâche cartésienne permet de définir une pose cartésienne de référence  $X^{\text{ref}}$  qui doit être suivie par un repère attaché à l'humain virtuel. Par exemple, il peut s'agir de suivre une trajectoire avec la main, suivre du regard un point de l'espace ou bien maintenir une position fixe des pieds sur le sol.

La tâche cartésienne s'exprime dans l'espace opérationnel (voir [équation 3.3](#)). De la même manière qu'avec la tâche posturale, l'accélération cartésienne désirée  $\ddot{X}^*$  est obtenue à l'aide d'un contrôleur PD :

$$\ddot{X}^* = K_p(X - X^{\text{ref}}) + K_d(\dot{X} - \dot{X}^{\text{ref}}) + \ddot{X}^{\text{ref}} \quad (3.6)$$

avec  $(K_p, K_d)$  les gains proportionnel et dérivé du contrôleur PD,  $(X^{\text{ref}}, \dot{X}^{\text{ref}}, \ddot{X}^{\text{ref}})$  les références en pose, vitesse et accélération cartésiennes. À noter que dans l'équation précédente, les translations et les rotations sont regroupées dans la même équation, pour simplifier l'écriture. Contrairement aux erreurs en translation, les erreurs en rotation ne se calculent pas comme une simple différence entre deux termes<sup>2</sup>. De plus, l'erreur en rotation n'est pas comparable d'un point de vue dimensionnel avec une erreur en translation. En pratique,  $K_p$  et  $K_d$  sont des matrices diagonales permettant de définir des gains différents pour la translation et la rotation, et d'ajuster l'importance relative données aux erreurs en rotation ou en translation.

Le contrôleur PD permet ici d'imposer une dynamique du second ordre sur l'asservissement des positions articulaires. Ici, une méthode simple utilisée pour le réglage des gains  $(K_p, K_d)$  consiste à fixer la valeur de  $K_p$  jusqu'à avoir une réponse indicielle suffisamment réactive, puis de calculer  $K_d$  pour se trouver dans un régime critique (soit  $K_p = 2\sqrt{K_d}$  après l'identification des termes sur l'équation différentielle du second ordre). De manière générale, la valeur de ces gains doivent aussi prendre en compte la masse des segments de l'humain. Il existe d'autres approches pour régler ces gains, basées sur des heuristiques (ZIEGLER et al., 1942) ou des méthodes d'optimisation (CHARBONNEAU et al., 2018).

### 3.3.2.2 Tâche posturale

La tâche posturale est utilisée pour que l'humain atteigne au mieux une configuration articulaire de référence  $q^{\text{ref}}$ . Le but est alors de minimiser le terme d'erreur  $(q - q^{\text{ref}})$  avec  $q$  la configuration articulaire courante.

La tâche posturale s'exprime comme une tâche dans l'espace des accélérations articulaires ([équation 3.2](#)), où  $\ddot{q}^*$  définit un contrôleur proportionnel-dérivé (PD) :

$$\ddot{q}^* = K_p(q - q^{\text{ref}}) + K_d(\dot{q} - \dot{q}^{\text{ref}}) + \ddot{q}^{\text{ref}} \quad (3.7)$$

avec  $(K_p, K_d)$  les gains proportionnel et dérivé du contrôleur PD,  $(q^{\text{ref}}, \dot{q}^{\text{ref}}, \ddot{q}^{\text{ref}})$  les références en positions, vitesses et accélérations articulaires. Dans un contexte d'animation d'humains virtuels,  $q^{\text{ref}}$  peut correspondre à une posture ergonomique de référence telle que définie dans les indicateurs ergonomiques de type RULA (MCATAMNEY et al., 1993).

---

2. L'erreur en rotation est d'abord exprimée en quaternions ( $q_{\text{diff}} = q_A q_B^{-1}$ ), puis correspond à l'angle de rotation dans la représentation *angle-axis* associée.



### 3.3.2.3 Tâche de centre de masse

La tâche de centre de masse (CdM) sert principalement à gérer l'équilibre dynamique de l'humain virtuel. La tâche vise à asservir la position du CdM, de telle sorte que sa projection sur le sol reste dans le polygone de support (c.-à-d. enveloppe convexe de l'ensemble des points d'appui) dans le cas de contacts coplanaires ou que sa position reste dans une région de stabilité dans le cas de contacts non-coplanaires (ROUX et al., 2021).

La tâche de CdM est formulée dans l'espace cartésien (équation 3.3) comme suit :

$$\left\| J_{\text{com}}\dot{\nu} + \dot{J}_{\text{com}}\nu - \ddot{x}_{\text{com}}^* \right\|^2 \quad (3.8)$$

avec  $J_{\text{com}}$  la Jacobienne du CdM exprimée dans le repère inertiel et  $x_{\text{com}} \in \mathbb{R}^3$  la position du CdM.

Un contrôleur PD (voir sous-sous-section 3.3.2.2) permet de calculer les accélérations linéaires désirées  $\ddot{x}_{\text{com}}$  à chaque pas de simulation :

$$\ddot{x}_{\text{com}}^* = K_p(x_{\text{com}} - x_{\text{com}}^{\text{ref}}) + K_d(\dot{x}_{\text{com}} - \dot{x}_{\text{com}}^{\text{ref}}) + \ddot{x}_{\text{com}}^{\text{ref}} \quad (3.9)$$

avec  $(x_{\text{com}}^{\text{ref}}, \dot{x}_{\text{com}}^{\text{ref}}, \ddot{x}_{\text{com}}^{\text{ref}})$  les références en position, vitesse et accélération sur le centre de masse. Pour des mouvements en quasi-statique,  $x_{\text{com}}^{\text{ref}}$  est à l'intérieur du polygone de support, avec  $\dot{x}_{\text{com}}^{\text{ref}} = 0$  et  $\ddot{x}_{\text{com}}^{\text{ref}} = 0$ .

### 3.3.2.4 Tâche de moment angulaire

Tout comme la tâche de CdM, la tâche de moment angulaire sert à gérer la dynamique centroidale (c.-à-d. le point matériel associé au CdM) de l'humain virtuel. Dans (ORIN et al., 2008), les auteurs montrent que le contrôle du moment angulaire améliore la stabilité de l'humanoïde, en limitant le balancement superflu sur le haut du corps face à des perturbations extérieures.

La tâche de moment angulaire se formule aussi dans l'espace cartésien (équation 3.3) comme suit :

$$\left\| J_{\text{am}}\dot{\nu} + \dot{J}_{\text{am}}\nu - \dot{L}^* \right\|^2 \quad (3.10)$$

avec  $J_{\text{am}}$  la Jacobienne des moments angulaires (c.-à-d. la partie en rotation de la matrice des moments angulaires, voir (ORIN et al., 2008)) et  $L \in \mathbb{R}^3$  le moment angulaire centroidal.

De la même manière, un contrôleur PD (voir sous-sous-section 3.3.2.2) permet de calculer  $\dot{L}^*$  à chaque pas de simulation :

$$\dot{L}^* = K_p(L - L^{\text{ref}}) + \dot{L}^{\text{ref}} \quad (3.11)$$

avec  $(L^{\text{ref}}, \dot{L}^{\text{ref}})$  les références sur le moment angulaire et sa vitesse.

### 3.3.3 Contraintes QP

Dans la définition du problème QP interviennent des contraintes d'égalité ou d'inégalité pour garantir le respect des limites physiques de l'humain et du non-glissement des contacts.

### 3.3.3.1 Limites cinématiques

Les limites articulaires en position, vitesse et accélération sont classiquement définies par les trois contraintes d'inégalités suivantes (SALINI et al., 2011) :

- les **limites en positions articulaires** ( $q_{\min}, q_{\max}$ ). Pour éviter un dépassement des limites articulaires après un pas de temps de simulation  $\delta t$ , les inégalités suivantes doivent être respectées :

$$\frac{2(q_{\min} - q - \dot{q} \delta t)}{\delta t^2} \leq \ddot{q} \leq \frac{2(q_{\max} - q - \dot{q} \delta t)}{\delta t^2} \quad (3.12)$$

- les **limites en vitesse articulaire**  $\dot{q}_{\max}$ . Pour éviter un dépassement des limites en vitesses, les conditions suivantes doivent être respectées :

$$\frac{\dot{q}_{\min} - \dot{q}}{\delta t} \leq \ddot{q} \leq \frac{\dot{q}_{\max} - \dot{q}}{\delta t} \quad (3.13)$$

- les **limites en accélération articulaire**  $\ddot{q}_{\max}$ . Cette contrainte s'exprime directement dans l'espace des accélérations articulaires :

$$-\ddot{q}_{\max} \leq \ddot{q} \leq \ddot{q}_{\max} \quad (3.14)$$

Pour réconcilier les trois contraintes d'inégalités (3.12), (3.13), (3.14), la valeur la plus conservatrice est sélectionnée parmi les trois bornes inférieures et supérieures :

$$\max \left( \frac{2(q_{\min} - q - \dot{q} \delta t)}{\delta t^2}, \frac{\dot{q}_{\min} - \dot{q}}{\delta t}, -\ddot{q}_{\max} \right) \leq \ddot{q} \leq \min \left( \frac{2(q_{\max} - q - \dot{q} \delta t)}{\delta t^2}, \frac{\dot{q}_{\max} - \dot{q}}{\delta t}, \ddot{q}_{\max} \right) \quad (3.15)$$

Dans TSID, un terme de viabilité supplémentaire est ajouté aux limites articulaires cinématiques. Ce terme est décrit plus en détails dans les travaux de (DEL PRETE, 2018). L'idée est de se limiter aux états articulaires depuis lesquels il est possible de suffisamment décélérer, pour atteindre la limite avec une vitesse nulle, en prenant en compte l'ensemble des limites articulaires cinématiques. Cette condition sert principalement à éviter les solutions sur  $\ddot{q}$  qui amènent à des configurations où le problème QP n'a pas de solutions. Cette condition permet aussi dans une moindre mesure d'éviter d'arriver sur les butées articulaires avec une vitesse trop élevée, ce qui peut être un facteur de blessure pour l'humain.

### 3.3.3.2 Limites en couples articulaires

Les limites en couples articulaires servent à définir les efforts maximaux que l'humain peut fournir sur chacune de ses articulations. Ces limites s'expriment dans l'espace des couples articulaires selon la contrainte d'inégalité suivante :

$$\tau_{\min} \leq \tau \leq \tau_{\max} \quad (3.16)$$

avec  $(\tau_{\min}, \tau_{\max})$  les bornes inférieures et supérieures sur les couples articulaires. Ici, les capacités en couples sont considérées comme identiques dans les deux sens d'actionnement :

$$\tau_{\min} = -\tau_{\max} \leq 0 \quad (3.17)$$

Il s'agit d'une hypothèse simplificatrice : sur un humain réel, des groupes musculaires différents sont sollicités suivant le sens d'actionnement dont les capacités musculaires sont différentes en général.

### 3.3.3.3 Modèle de contact

Sur un poste de travail, l'humain s'aide de contacts physiques avec l'environnement (à commencer par le sol) pour effectuer l'activité. Pour ces travaux, un modèle surfacique de contact est utilisé dans le contrôleur, lorsque le segment du corps et l'environnement forment une liaison plan-plan avec au moins 3 points d'appui non colinéaires.

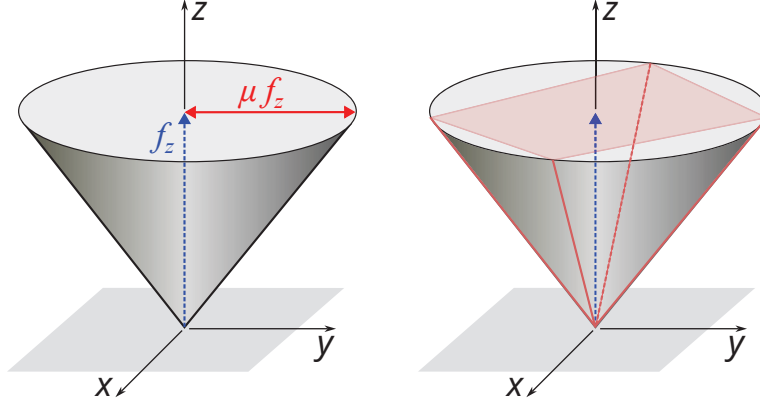


FIGURE 3.4 – **À gauche** : le cône de friction statique, avec  $\mu$  le coefficient de frottement statique et  $f_z$  la composante normale de la force de contact. **À droite** : le cône de friction linéarisé en 4 facettes utilisé dans notre modèle de contact.

Un contact surfacique est modélisé par l'ensemble des tâches et des contraintes suivantes :

- une contrainte d'égalité d'**accélération nulles** au niveau du corps rigide de l'humain en contact, avec  $X_{\text{contact}}$  sa pose cartésienne :

$$\|\ddot{X}_{\text{contact}}\|^2 = 0 \quad (3.18)$$

- une contrainte d'inégalité de **non-glissement du contact**. Soit  $f_c^t$  et  $f_c^n$  les composantes tangentielle et normale d'une force de contact  $f_c$ . La contrainte est respectée si la force reste à l'intérieur du cône de friction, c.-à-d.  $\|f_c^t\| \leq \mu \|f_c^n\|$ , avec  $\mu$  le coefficient de friction statique entre les deux corps rigides en contact. Dans la formulation du QP utilisée, ce cône de friction est linéarisé en 4 facettes et s'exprime comme suit :

$$\begin{bmatrix} +1 & -1 & \mu \\ +1 & +1 & \mu \\ -1 & +1 & \mu \\ -1 & -1 & \mu \end{bmatrix} f_c \geq 0 \quad (3.19)$$

La [figure 3.4](#) donne une illustration du cône de friction linéarisé, avec  $f_z := f_c^n$ .

- une contrainte d'inégalité sur la **force de contact**, sur la composante normale de la force de contact  $f_c^n$ , avec  $f_{c,\max}^n$  la force maximale et  $f_{c,\min}^n$  la force minimale.

$$f_{c,\min}^n < f_c^n < f_{c,\max}^n \quad (3.20)$$

- une tâche de **minimisation des forces de contact**, pour favoriser les solutions où l'humain minimise les forces exercées sur l'environnement.

$$\|f_c\|^2 = 0 \quad (3.21)$$

### 3.4 Interfaçage entre physique et contrôle

Cette section donne des détails techniques sur l'implémentation du contrôleur QP (basé sur TSID) dans la simulation physique d'humains virtuels (basé sur XDE), dans l'optique de simuler différentes morphologies d'humains sur différents scénarios de poste de travail.

#### 3.4.1 Fonctionnement général

La simulation d'humains virtuels sépare la simulation physique (côté serveur) et l'interface graphique utilisateur (côté client) avec un fonctionnement asynchrone entre les deux parties. Les paramètres liés à la simulation et au contrôle peuvent être configurés hors-ligne (à travers des fichiers de configuration) ou en ligne (à travers l'interface client-serveur de XSM). Le contrôleur QP basé sur TSID est implémenté côté serveur et est synchrone avec la simulation physique. La [figure 3.5](#) donne une vue d'ensemble des principaux éléments de la simulation utilisée pour les travaux décrits dans la suite du manuscrit ([chapitre 4](#), [chapitre 5](#)).

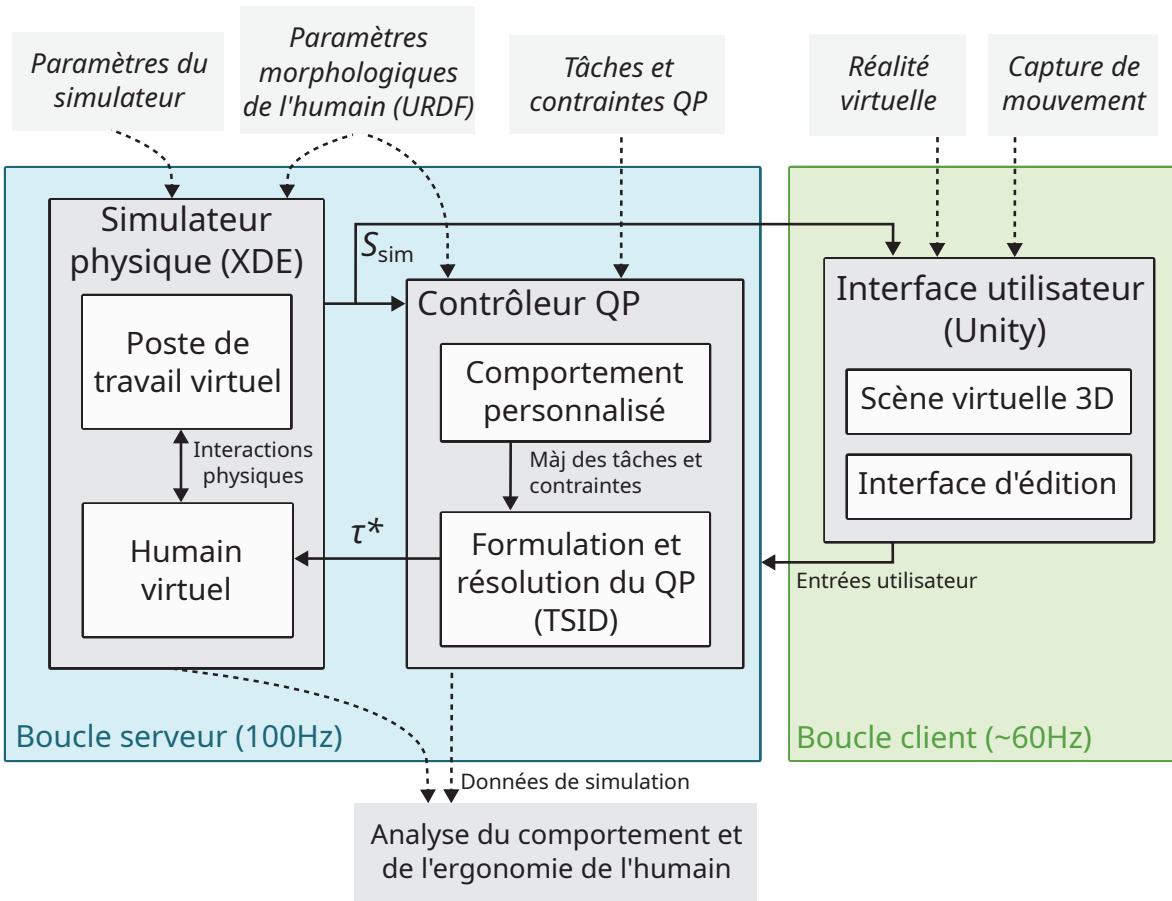


FIGURE 3.5 – Schéma du fonctionnement global de la simulation d'humain virtuel basée sur XDE, montrant les composants côté serveur liés à la simulation physique (en bleu) et côté client liés à l'interface utilisateur (en vert).  $S_{sim}$  désigne l'état de la simulation, c'est-à-dire la configuration et les vitesses de l'humain, l'état des contacts.  $\tau^*$  est la commande en couples articulaires calculée par TSID et donnée en entrée des actionneurs de l'humain virtuel en simulation physique. Les lignes pointillées relient des entrées et sorties externes à l'architecture de simulation. Le comportement personnalisé correspond au choix du *Behavior* dans l'architecture d'interfaçage implémentée entre XDE et TSID (sous-section 3.4.2).

**Configuration de l'humain virtuel :** Pour configurer différentes morphologies, l'humain virtuel est d'abord créé dans XDE à l'aide des outils de configuration d'humain virtuel implémentés dans le simulateur (voir sous-section 3.2.2). Le modèle de l'humain est ensuite exporté dans un fichier URDF (Unified Robot Description File). Ce fichier est ensuite importé dans TSID (et plus précisément dans Pinocchio) pour construire le modèle de l'humain virtuel (équation 3.1d).

**Entrées utilisateurs :** Côté client (c.-à-d. interface Unity), l'utilisateur peut appeler des fonctions pour modifier côté serveur (c.-à-d. simulation physique) le paramétrage du contrôleur QP, c'est-à-dire les références, les poids ou les gains des tâches QP. Concernant les références des tâches cartésiennes du contrôleur QP, les trajectoires peuvent être définies de différentes manières. L'utilisateur peut générer des trajectoires par interpolation des repères clefs, ou importer des trajectoires (préenregistrées ou en temps réel) issues de la capture de mouvement.

**Contrôle de l'humain virtuel :** Le contrôleur QP est implémenté côté serveur et tourne à la même fréquence que la simulation physique XDE (100 Hz). Au début de la boucle, l'état de la simulation physique est récupéré pour mettre à jour le modèle dynamique de l'humain dans TSID, avec les positions et vitesses articulaires ( $\mathbf{q}, \mathbf{v}$ ) et potentiellement les contacts détectés par le moteur physique entre l'humain et le poste de travail. Selon le comportement souhaité, un contact détecté dans la simulation physique peut ne pas être modélisé dans le contrôleur pour être considéré comme une perturbation extérieure. Les modifications sur le paramétrage du contrôleur QP liées aux entrées utilisateurs sont prises en compte pour mettre à jour l'ensemble des tâches et des contraintes dans la formulation QP. Le problème QP est résolu et les couples articulaires  $\tau^*$  (si une solution existe) sont envoyés à l'humain virtuel. Enfin, le moteur physique effectue une intégration des lois de la dynamique et résout les collisions pour calculer l'état suivant du système.

**Asynchronisme de simulation :** L'architecture client-serveur permet un fonctionnement asynchrone entre le contrôle QP situé dans la boucle du moteur physique et l'interface utilisateur sous Unity. Le contrôleur QP tourne à une fréquence élevée et fixe (ici à 100 Hz), tandis que l'interface utilisateur peut gérer l'affichage graphique et les entrées utilisateurs à une fréquence plus faible (environ 60 Hz) (figure 3.5). Ce découplage est intéressant pour des applications interactives là où le rendu graphique (potentiellement coûteux) ne doit pas bloquer la simulation physique. En revanche, dans le cadre d'expériences scientifiques, le fonctionnement asynchrone de la simulation introduit potentiellement de l'indéterminisme sur les résultats. D'un essai à l'autre, il n'est pas garanti que les entrées utilisateurs (en particulier des références cartésiennes) soient reçues à un pas de simulation identique au niveau du contrôleur QP. Dans ce cas, toutes les entrées utilisateurs doivent être spécifiées à l'initialisation et l'interface utilisateur ne sert qu'au rendu graphique.

### 3.4.2 Architecture du composant `xde::control::tsid`

Pour les travaux de thèse, nous avons développé le module `xde::control::tsid` pour intégrer la bibliothèque de contrôle TSID dans la simulation physique XDE (en C++). Le module est implémenté en C++(paradigme objet) et contient plusieurs classes, pour gérer l'interfaçage avec TSID et les autres modules de XDE (en particulier, le module de contrôle de l'humain virtuel XDE), les comportements de l'humain virtuel ou le stockage des informations pertinentes pour le contrôleur. La figure 3.6 donne une vue d'ensemble du module implémenté.

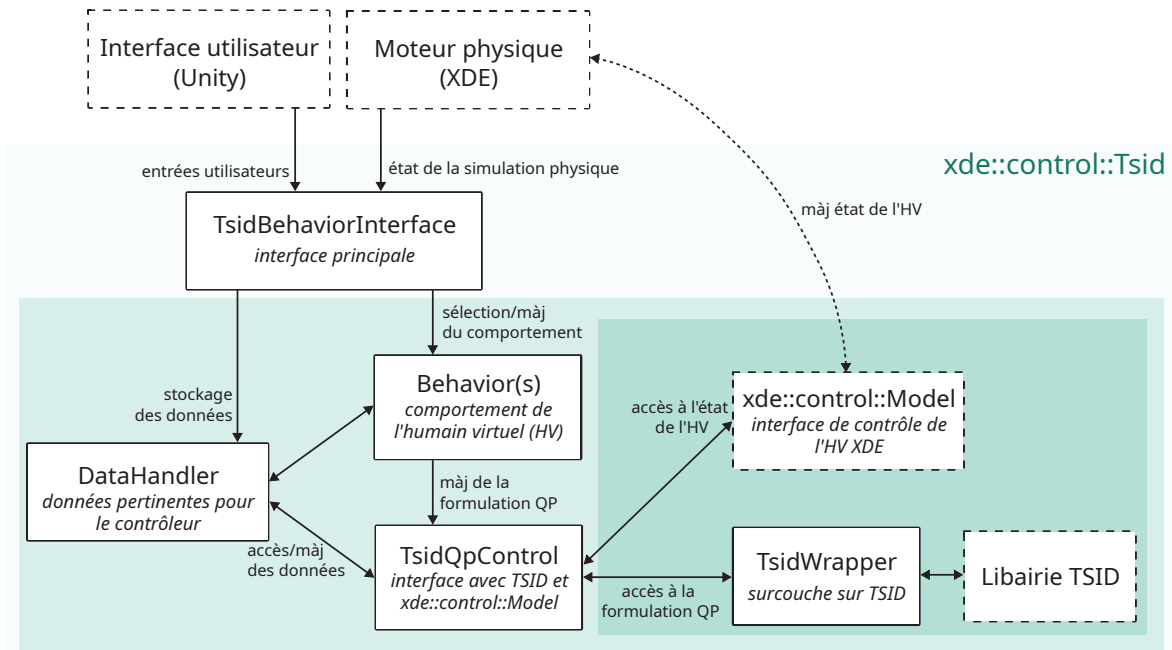


FIGURE 3.6 – Schéma d'ensemble du composant `xde::control::tsid` montrant les principales classes implémentées (rectangle continu), les relations fonctionnelles entre elles et avec d'autres composants existants de XDE (rectangle pointillé). Les niveaux d'encapsulation sont indiqués par le fond vert en semi-transparent.

- **TsidWrapper** : surcouche par dessus la bibliothèque TSID, pour simplifier la définition des tâches et des contraintes QP et la résolution du problème QP.
- **TsidQpControl** : interface entre le contrôleur QP et l'interface de contrôle de l'humain virtuel XDE (`xde::control::Model`) déjà implémentée. La classe **TsidQpControl** permet principalement de récupérer (resp. envoyer) les valeurs de  $\mathbf{q}, \nu, \tau$  depuis (resp. vers) l'humain virtuel. En outre, son rôle est d'effectuer les conversions nécessaires pour faire correspondre les conventions de nommage des DDLs et de systèmes de coordonnées différents utilisés par XDE et TSID.<sup>3</sup>
- **DataHandler** : conteneur pour stocker les données issues de la simulation (configuration de l'humain virtuel, contacts détectées, etc.) et les entrées utilisateur (morphologie de l'humain, paramétrage du contrôleur QP, trajectoires de références, contacts à modéliser dans le contrôleur QP, etc.).
- **Behavior** : implémentation d'un comportement de l'humain virtuel. La classe se base sur les fonctions du **TsidWrapper** et les données contenues dans le **DataHandler** pour ajouter et modifier des tâches et des contraintes QP dans la formulation du problème. Différents types de **Behavior** peuvent être implémentés, suivant le comportement souhaité et le scénario de poste de travail simulé. Chaque **Behavior** hérite d'une classe **BaseBehavior** qui définit une interface unifiée entre les différents comportements.
- **TsidBehaviorInterface** : interface unique pour instancier, initialiser et mettre à jour dans la boucle de simulation physique l'ensemble des classes présentées ci-dessus.

3. Pour le système de coordonnées, XDE utilise des repères orthonormés indirects, avec Y vers le haut (convention liée à Unity et classique dans le domaine du graphisme). TSID utilise des repères orthonormés directs, avec Z vers le haut (convention classique en robotique).

Cette architecture permet donc de mettre en relation les composants existants du simulateur (moteur physique, interface de contrôle de l'humain virtuel, interface Unity) avec la bibliothèque TSID, tout en restant suffisamment générique pour être adapté à différents scénarios de poste de travail. Lorsque le scénario change, il s'agit principalement de créer un nouveau comportement (à partir des classes `Behavior`) et d'ajouter les informations manquantes dans la classe `DataHandler`.

## 3.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les principaux outils utilisés dans le cadre de la thèse pour simuler des humains virtuels. D'une part, la simulation d'humains virtuels basée sur le moteur physique XDE permet de modéliser différentes morphologies d'humains. L'interface utilisateur basée sur Unity facilite la création et la visualisation de postes de travail virtuels ainsi que l'interaction avec la simulation physique et l'humain virtuel. D'autre part, le contrôleur corps-complet QP permet de générer des animations physiquement réalistes et en temps interactif. La formulation des tâches et des contraintes est suffisamment générique pour être applicable sur différentes morphologies d'humains. Le contrôleur expose en outre divers paramètres, qui peuvent être adaptés selon l'activité simulée ou la morphologie étudiée.

Dans le cadre de la thèse, il a été nécessaire d'interfacer la simulation physique (XDE) avec la bibliothèque de contrôle QP (TSID). Nous avons implémenté un module intégré à la plateforme de simulation XDE et qui permet de gérer différents comportements sur l'humain virtuel en fonction du scénario de poste de travail simulé.

Les deux chapitres suivants de contribution montrent comment ces outils de simulation permettent d'étudier l'influence de la morphologie sur l'ergonomie d'un poste de travail et avec deux approches différentes. Le [chapitre 4](#) propose une approche interactive basée sur la réalité virtuelle pour évaluer en immersion l'ergonomie d'un poste de travail sur quelques morphologies. Le [chapitre 5](#) étend l'analyse à une plus large population de morphologies, avec une optimisation à plus grande échelle des comportements des humains virtuels.





# Chapitre 4

## Mise en posture en réalité virtuelle

### Sommaire

---

<b>4.1</b>	<b>Introduction</b>	<b>51</b>
<b>4.2</b>	<b>Mannequin physique et interactif</b>	<b>53</b>
4.2.1	Contrôle corps-complet	53
4.2.2	Interactions en réalité virtuelle	57
<b>4.3</b>	<b>Cas d’usage</b>	<b>60</b>
4.3.1	Description du cas d’usage	60
4.3.2	Evaluation ergonomique	62
4.3.3	Discussions	65
<b>4.4</b>	<b>Conclusion</b>	<b>66</b>
4.4.1	Synthèse	66
4.4.2	Perspectives	67

---

### 4.1 Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons présenté les outils de simulation d’humains virtuels utilisés dans le cadre de la thèse pour répondre au problème principal, c’est-à-dire évaluer l’influence de la morphologie des opérateurs sur l’ergonomie d’un poste de travail. En particulier, un sous-objectif de la thèse consiste à faciliter ce processus d’évaluation pour un ergonome, pour l’aider à améliorer les postes de travail. Dans le [chapitre 3](#), la simulation physique d’humains virtuels fonctionne en temps interactif : cela ouvre la voie à des approches dans lesquelles l’ergonome peut interagir directement avec différentes morphologies d’humains virtuels et visualiser sans délai le risque ergonomique lié au poste de travail.

Dans ce contexte, un premier problème consiste à générer des comportements (postures, mouvements) réalistes sur des humains virtuels en interaction avec un utilisateur. Il s’agit d’un problème classique dans le domaine de l’animation et en particulier dans le jeu vidéo, où il est en général souhaitable que le personnage contrôlé par le joueur ait des comportements et des interactions réalistes avec l’environnement. Comme présenté dans le [chapitre 2](#), les approches basées sur les clés d’animation et sur la cinématique inverse sont couramment utilisés. Cependant, ces approches sont purement cinématiques : elles produisent des comportements visuellement plausibles, mais qui manquent de réalisme physique en particulier lorsqu’il y a des interactions physiques avec l’environnement. Les approches basées sur la simulation physique permettent de générer des comportements plus réalistes et aussi d’obtenir

une estimation plus réaliste des efforts internes, ce qui est intéressant en évaluation ergonomique ([chapitre 2](#)). Cependant, la simulation physique impose des contraintes qui rendent plus difficiles les interactions entre l'humain virtuel et l'utilisateur. En effet, l'humain virtuel doit réagir correctement par rapport aux consignes et aux perturbations liées à l'utilisateur, tout en gérant son équilibre.

Un autre problème vient de l'interface informatique typique en 2D (souris et écran 2D) utilisée pour travailler sur des environnements virtuels en 3D. Les objets d'une scène 3D se retrouvent projetés sur une vue 2D monoscopique, ce qui pose problème pour visualiser des objets sur différents niveaux de profondeur (WARE et al., 1994). La souris 2D classique offre une interface peu intuitive pour naviguer dans une scène 3D et gérer l'orientation d'objets, ce qui justifie l'utilisation de matériel spécialisé de type souris 3D (*Space Mouse*). Ces éléments rendent difficile le travail de mise en posture d'un humain virtuel, en particulier pour configurer l'orientation des repères ou pour définir des trajectoires non planes à suivre par ces repères. Une interface en 2D est donc limitante pour interagir avec des objets et visualiser des métriques spatialisées dans une scène 3D (LAMBERTI et al., 2020).

**Réalité virtuelle et animation d'humains** Pour répondre à ces problèmes, la réalité virtuelle (RV) semble être une piste intéressante à explorer pour faciliter la mise en posture de l'humain virtuel et la visualisation du risque ergonomique. La réalité virtuelle est une technologie qui a rapidement gagné en maturité et en accessibilité ces dernières années et qui permet d'évoluer dans des environnements 3D de manière plus naturelle et immersive. Dans l'industrie, un nombre croissant de travaux s'intéresse à son utilisation en ergonomie et plus spécifiquement pour réduire le coût pour prototyper des postes de travail ergonomiques. WEISTROFFER et al. (2022) montrent l'intérêt de la réalité virtuelle pour la création de jumeaux numériques et l'évaluation ergonomique de postes de travail. Avec la réalité virtuelle, l'opérateur peut effectuer des activités sur des postes de travail virtuels et se faire une idée de la complexité d'une activité manuelle sans avoir à construire un prototype réel. Les mouvements capturés sur l'opérateur sont rejoués en cinématique inverse sur un humain virtuel de morphologie équivalente, en vue d'analyses ergonomiques. Dans ce cas d'application, l'humain virtuel doit reproduire le plus fidèlement possible les mouvements de l'opérateur réel ; les deux entités sont co-localisées dans la scène.

Pour mettre en posture l'humain, l'utilisateur en réalité virtuelle se place plutôt en observateur extérieur par rapport à l'humain virtuel (qui représente l'opérateur), tel un marionnettiste et son pantin. Avec une vue globale sur l'humain virtuel, l'utilisateur est plus à même de visualiser la posture du mannequin et de surveiller les valeurs de divers indicateurs ergonomiques.

Pour l'animation de personnages 3D, de plus en plus de travaux et d'outils commerciaux mettent en avant le potentiel de la réalité virtuelle pour améliorer le processus créatif (SHARMA et al., 2023 ; LAMBERTI et al., 2020). Parmi les outils récents, on peut citer AnimationVR ou Maestro comme prototypes de recherche et Tвори, Marui ou Mindshow comme outils commerciaux. Dans AnimationVR (VOGEL et al., 2018), l'utilisateur en réalité virtuelle est en immersion dans la scène d'animation dans laquelle il peut librement déplacer les objets et configurer la posture des personnages. L'utilisateur dispose d'une frise chronologique (*timeline*) et d'une caméra virtuelle pour enregistrer et éditer des animations. L'évaluation avec des experts suggère que l'interface en RV proposée par l'outil accélère le processus d'animation tout en étant rapide à prendre en main. En contrepartie, les fonctionnalités sont limitées et la précision est moindre, ce qui limite l'utilisation de ce type d'outils dans un cadre professionnel. (LAMBERTI et al., 2020) proposent un outil intégré dans Blender pour un usage

professionnel, ainsi qu'une étude sur les possibles avantages de l'outil (et plus généralement de la RV) en animation 3D. L'étude d'utilisabilité montre que l'immersion en RV stimule la créativité et la productivité des animateurs, en leur permettant de travailler directement dans l'environnement 3D natif de la scène. L'étude confirme aussi l'intuitivité et la simplicité d'utilisation de l'interface en RV. En pratique, un animateur professionnel pourrait rapidement s'appropriier l'outil pour l'intégrer dans son schéma de travail, tandis qu'un non-expert pourrait s'initier plus facilement à l'animation 3D sans formation préalable.

Il existe donc différents outils en réalité virtuelle pour animer un humain, basés sur des données des mouvements d'un opérateur réel ou la manipulation directe de la posture de l'humain. Que ce soit en ergonomie ou en animation 3D, la réalité virtuelle constitue un outil intuitif à prendre en main permettant d'être plus productif dans un environnement 3D. Cependant, ces travaux basés sur la réalité virtuelle ne considèrent pas les efforts appliqués sur l'humain virtuel et intéressants à analyser dans un contexte d'évaluation de l'ergonomie. La simulation physique permettrait d'améliorer l'approche, avec la génération de comportements plus réalistes (d'un point de vue dynamique) et une estimation des couples articulaires plus fiable.

Dans ce chapitre, une nouvelle approche couplant la réalité virtuelle et la simulation physique est introduite pour rendre plus interactive et immersive l'évaluation ergonomique sur des humains virtuels. L'approche reprend l'idée de manipulation d'un mannequin articulé, mais ici en simulation physique, avec un contrôleur corps-complet calculant les couples d'actionnement de l'humain virtuel. Ce contrôleur permet de générer des postures réalistes d'un point de vue physique sur différentes morphologies, par la prise en compte du modèle dynamique de l'humain. L'objectif est de proposer un outil qui facilite l'étude de l'influence de la morphologie sur l'ergonomie de postes de travail. La suite du chapitre détaille la méthode, en particulier l'interface en réalité virtuelle et la configuration du contrôleur corps-complet. L'outil est ensuite démontré dans un scénario de mise en posture pour différentes morphologies d'humains virtuels.

## 4.2 Mannequin physique et interactif

L'approche proposée couplant la simulation physique et la réalité virtuelle est présentée (figure 4.1). Dans la simulation physique, l'humain est modélisé sous la forme d'un pantin articulé et animé à l'aide d'un contrôleur corps-complet (sous-section 4.2.1). À travers une interface en réalité virtuelle, un utilisateur peut interagir avec l'humain virtuel et visualiser le niveau de risque lié à l'ergonomie (sous-section 4.2.2). Dans la suite du chapitre, ces deux composantes principales (c.-à-d. l'humain virtuel physique et l'interface en réalité virtuelle) sont détaillées. En particulier, notre outil permet à l'utilisateur de tester différentes postures sur l'humain virtuel, en étant le moins possible limité par les contraintes liées à la physique dans ses interactions avec l'humain virtuel.

### 4.2.1 Contrôle corps-complet

Avec la simulation d'humains virtuels, on souhaite pouvoir simuler des scénarios sur une variété de postes de travail et pour une diversité de morphologies d'humain. Cependant, les contraintes liées à la physique doivent être prises en compte dans le contrôle de l'humain virtuel. Dans ce chapitre, on se limite à des scénarios de poste de travail classique où l'humain virtuel effectue l'activité en position debout.

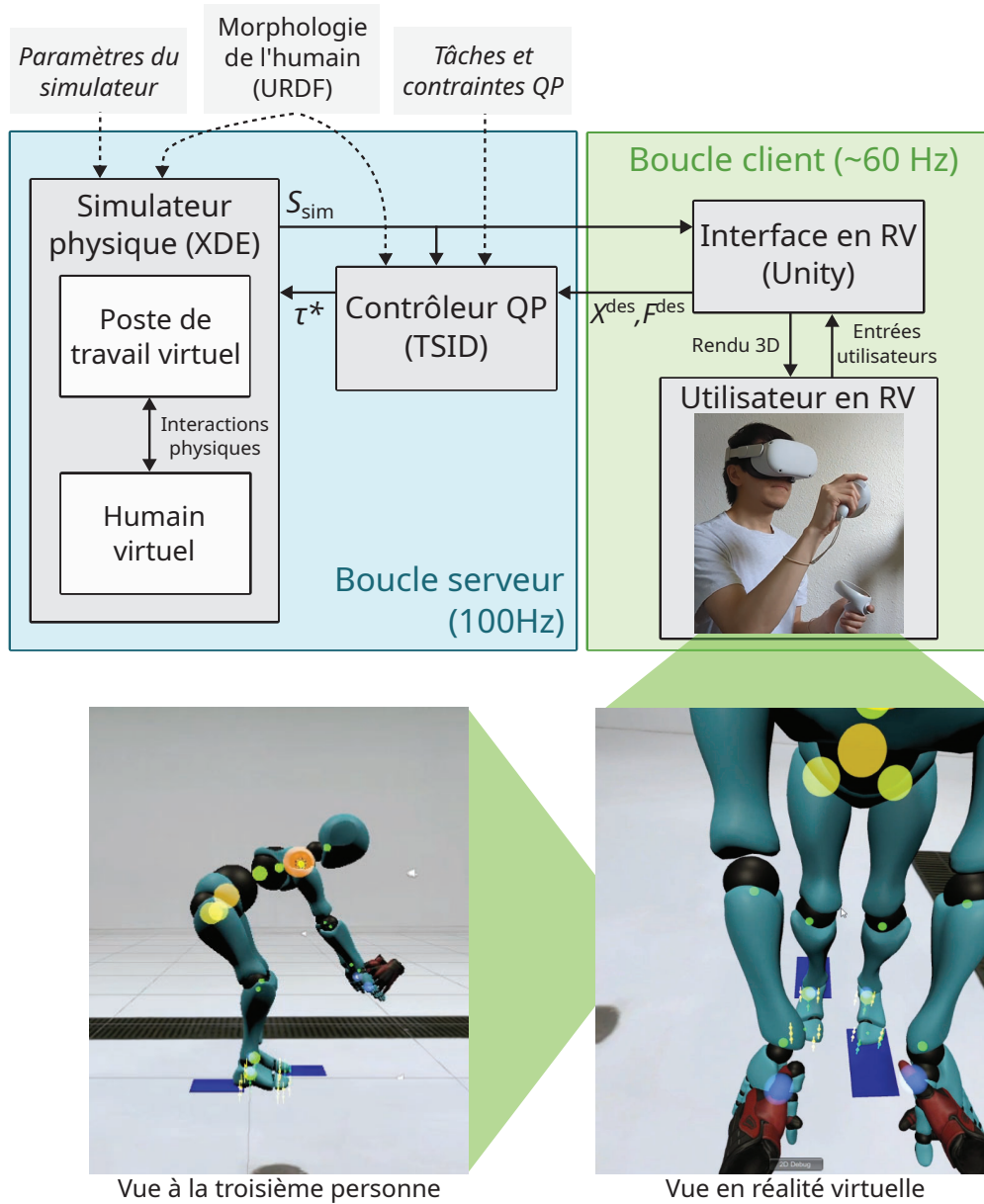


FIGURE 4.1 – Fonctionnement global de l'outil de mise en posture, avec  $S_{sim}$  l'état de la simulation,  $\tau^*$  la commande en couples articulaires,  $(X^{des}, F^{des})$  les références cartésiennes et en force pour les tâches du contrôleur QP. L'outil se base sur une architecture client-serveur issue de la plateforme de simulation physique XDE (section 3.2). L'utilisateur interagit en réalité virtuelle avec le mannequin physique, à travers l'interface graphique sous Unity.

Pour simuler ces activités dans le moteur physique, l'humain virtuel est animé à l'aide du contrôleur corps-complet présenté plus tôt (section 3.3). Pour rappel, le problème de contrôle est formulé comme un problème d'optimisation quadratique, avec une fonction de coût convexe composée d'une somme pondérée de tâches à minimiser et sujette à des contraintes linéaires liées aux limites physiques à respecter. Ce problème d'optimisation est résolu à chaque pas de simulation pour calculer la commande en couples articulaires destinée à l'humain virtuel.

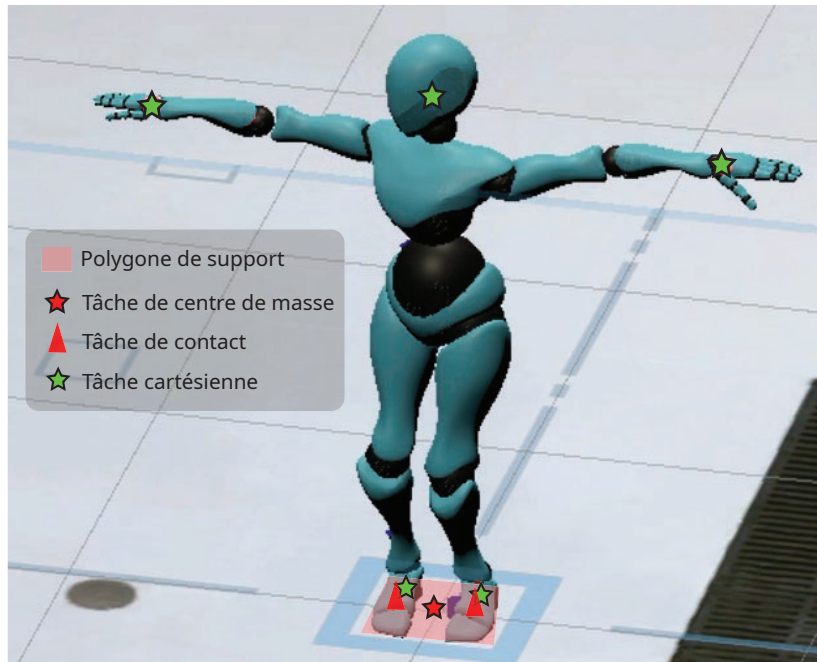


FIGURE 4.2 – Humain virtuel et visualisation des principales tâches du contrôleur QP permettant d'interagir avec l'humain virtuel.

Ici, l'humain virtuel doit rester en équilibre et tenir compte des limites biomécaniques, tout en suivant au mieux les consignes données par l'utilisateur en réalité virtuelle. Pour ce qui est des comportements interactifs souhaités, l'humain virtuel doit atteindre des poses cartésiennes liées à l'activité tout en favorisant une posture ergonomique. De plus, le positionnement des contacts entre l'humain virtuel et l'environnement doit être modifiable, avec la possibilité de définir une force de référence sur les points d'appui. La figure 4.2 donne une vue d'ensemble des principales tâches du contrôleur QP. Plus précisément, les tâches et les contraintes sont :

- Une tâche sur le centre de masse (CdM) pour gérer l'équilibre du mannequin, avec un poids relativement élevé par rapport aux autres tâches (tableau 4.1). La référence sur le CdM est toujours définie à l'intérieur du polygone de support et est située par défaut au centre du polygone. Sa position (relative aux limites du polygone de support) peut être modifiée par l'utilisateur et lors des phases de transition liées à un changement d'appuis (entre les pieds et le sol).
- Une tâche cartésienne pour chaque segment du corps manipulable par l'utilisateur en réalité virtuelle. Ces tâches permettent de suivre les poses cartésiennes données par l'utilisateur, pour des repères rigidement liés à des segments clefs tels que les mains ou les pieds. Un poids relativement élevé est donné aux tâches cartésiennes, afin de privilégier le suivi des poses cartésiennes de référence données par l'utilisateur.

- Une tâche cartésienne sur la rotation de la tête pour que l’humain virtuel suive sa main du regard. Le choix de la main est spécifié par l’utilisateur.
- Des contacts pour assurer le non-glissement de contacts surfaciques, au niveau des pieds et des mains. Pour que l’humain virtuel puisse interagir librement avec son environnement, les ajouts et les suppressions des contacts doivent être gérés automatiquement au niveau du contrôleur (pour plus de détails, voir [sous-sous-section 4.2.2.2](#)).
- Une tâche posturale pour chacun des groupes articulaires suivants : le torse, le bras gauche, le bras droit et les jambes. Ainsi, le poids de chaque tâche peut être réglé différemment pour permettre un éloignement différent par rapport à la posture de référence pour chaque groupe articulaire. Ici, la posture de référence est la posture neutre (N-pose), qui est la posture ergonomique de référence dans REBA (HIGNETT et al., 2000), avec un léger fléchissement sur les articulations du coude et du genou pour éviter les configurations singulières ([figure 4.2](#)). Pour les valeurs des poids, une priorité plus grande est donnée au torse pour favoriser des postures où le dos est droit. À l’inverse, les poids pour les tâches posturales des bras sont faibles, pour permettre une mobilité plus importante sur les mouvements des bras.
- Une tâche sur le moment angulaire de poids faible. Le moment angulaire de référence est fixé à zéro pour privilégier des mouvements impliquant un basculement moins important du corps.
- Les contraintes sur les limites articulaires du mannequin (en position, en vitesse, en accélération et en couples).

Dans la suite du chapitre, une configuration unique du contrôleur décrite dans le [tableau 4.1](#) est utilisée pour toutes les morphologies et les scénarios simulés.

TABLE 4.1 – Paramétrage des tâches définies dans le contrôleur QP, avec les poids  $w$  et les gains proportionnels  $K_p$

Tâche	$w$	$K_p$
<i>Tâches posturales</i>		
Torse	60	150
Jambes	30	150
Bras	0.6	150
<i>Tâches Cartésiennes</i>		
Position effecteurs	100	1000
Rotation effecteurs	100	1000
Rotation tête	10	250
<i>Autres tâches</i>		
Position du CdM	100000	200
Moment angulaire	1	10
<i>Contacts</i>		
Position du contact (mains)	100	1000
Force de contact (mains)	10	-
Force de contact (pieds)	0.001	-



### 4.2.2 Interactions en réalité virtuelle

L'approche fonctionne avec n'importe quel casque de réalité virtuelle équipé de manettes disponible dans l'industrie. Le dispositif doit permettre un suivi précis de la tête et des mains de l'opérateur.

Grâce à la réalité virtuelle, l'utilisateur est en immersion dans le poste de travail de l'humain virtuel. L'utilisateur peut interagir en direct avec le mannequin physique pour le guider dans des activités manuelles. De plus, il peut se déplacer de manière naturelle dans la scène et visualiser simultanément des postures et les scores ergonomiques en 3D. Cette section détaille les modes d'interactions entre le mannequin physique et l'utilisateur en réalité virtuelle.

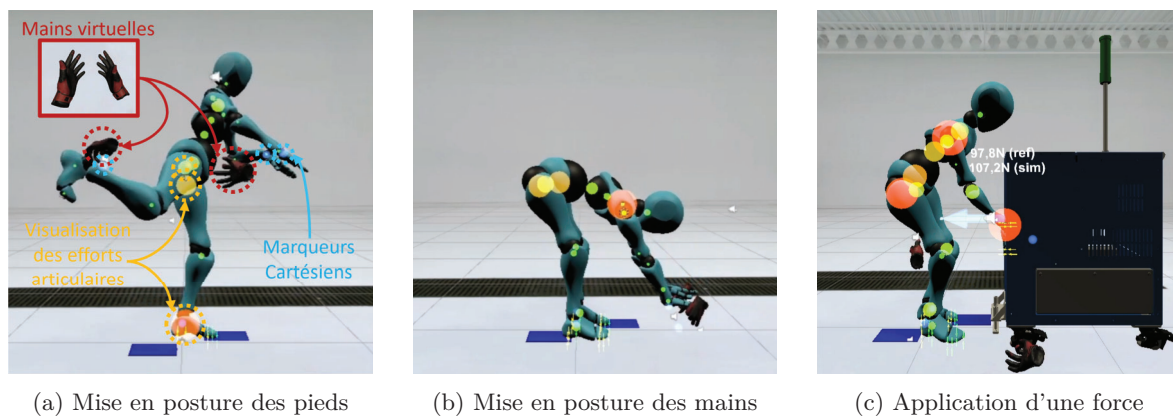


FIGURE 4.3 – Exemples de configurations de l'humain virtuel obtenus via l'outil de mise en posture. (a) Mise en posture de l'humain virtuel. L'utilisateur ajuste la pose d'un marqueur cartésien (ici, pour le pied droit) pour modifier la posture du mannequin. Les sphères colorées représentent les couples articulaires normalisés pour chacune des articulations. (b) Mise en posture des mains de l'humain virtuel. Les deux mains peuvent être attrapées (c) Application d'une force sur le poste de travail avec la main droite. L'utilisateur peut modifier la longueur de la flèche (en bleu transparent) pour ajuster la force de contact de référence au niveau de la tâche de contact.

#### 4.2.2.1 Mise en posture

Pour modifier la posture de l'humain virtuel, l'utilisateur en réalité virtuelle doit attraper et déplacer des marqueurs visuels avec ses manettes. Chaque marqueur représente la pose désirée d'un segment du corps de l'humain virtuel. La position d'un marqueur coïncide initialement avec l'origine du repère du segment associé. L'idée est de donner l'impression à l'utilisateur d'attraper directement les segments du corps de l'humain virtuel.

Au niveau du contrôleur corps-complet, ces marqueurs visuels définissent les poses de références des tâches cartésiennes correspondantes. Avec la formulation du contrôleur QP utilisée (sous-section 4.2.1), il est suffisant de définir des poses cartésiennes de référence sur quelques segments du corps pour générer la posture complète de l'humain virtuel. Pour l'instant, des marqueurs (et donc des tâches cartésiennes) sont définis pour les mains et les pieds de l'humain virtuel, c'est-à-dire aux extrémités de la chaîne cinématique de l'humain. Il est possible de définir des marqueurs supplémentaires sur les corps intermédiaires (bassin, genou, coude, etc.) pour un réglage plus fin de la posture de l'humain, avec cependant un risque de trop contraindre la posture de l'humain virtuel.



La figure 4.3 montre les interactions implémentées entre l'utilisateur en réalité virtuelle et l'humain virtuel physique. L'utilisateur peut manipuler les mains (figure 4.3b) et les pieds (figure 4.3a) de l'humain virtuel et modifier la force de contact lorsque la main est en appui sur une surface du poste de travail virtuel. La gestion des contacts entre l'humain virtuel et son environnement se fait automatiquement et est détaillée par la suite. Si l'humain virtuel perd l'équilibre et chute, celui-ci est replacé dans la posture neutre et les marqueurs cartésiens sont réinitialisés.

#### 4.2.2.2 Contacts avec l'environnement

Dans ces travaux, deux types de contacts sont considérés : (1) les contacts entre les pieds et le sol (2) les contacts entre les mains et le poste de travail.

**Contacts pieds-sol** Lors de la mise en posture, l'utilisateur doit pouvoir modifier la position des pieds afin de tester d'autres configurations d'appui entre les pieds et le sol. Avec la simulation physique, cela implique de devoir briser et créer des contacts avec des phases intermédiaires où l'humain tient en équilibre sur un seul pied. Cependant, pour garantir l'équilibre de l'humain virtuel, la position de son CdM doit rester à tout moment à l'intérieur du polygone de support et préférablement proche de son centre. Or, lorsque les points de contact changent, la surface du polygone de support est aussi modifiée de manière discontinue. Lorsqu'un pied est replacé sur le sol, le polygone de support s'agrandit et le CdM reste à l'intérieur du polygone de support. En revanche, lorsqu'un pied se détache du sol, le polygone de support se rétrécit : le CdM se retrouve instantanément en dehors du polygone de support et l'humain virtuel est déséquilibré.

Pour garder l'humain virtuel en équilibre lorsqu'un contact est brisé, une phase de transition est implémentée dans le contrôleur QP pour éviter un changement brusque sur la référence du CdM (Algorithme 1). Lorsque l'utilisateur manipule le marqueur cartésien d'un pied de pose  $\mathcal{X}_{\text{foot}}$ , s'il l'éloigne suffisamment du sol ( $> d_1 = 5 \text{ cm}$ ), le contact n'est pas immédiatement brisé (figure 4.4a). La référence du CdM est progressivement déplacée sur le CdM désiré, qui correspond au centre du prochain polygone de support après brisage du contact (figure 4.4b). Pour limiter la vitesse de variation de la position du CdM, un seuil de saturation  $\delta_{\text{max}}$  est fixé. Enfin, lorsque la position mesurée du CdM est suffisamment proche de la position de référence du CdM (à une constante près, fixée à  $d_2 = 0.005 \text{ m}$ ), le contact est désactivé dans le contrôleur QP et dans la simulation physique (figure 4.4c).

---

**Algorithme 1** Phase de transition lors du brisage d'un contact pieds/sol. La position du CdM (de référence) est déplacé sur le CdM désiré suivant avant de briser les contacts.

---

<b>if</b> $(\mathcal{X}_{\text{foot}} - X_{\text{foot}}^a) \cdot \mathbf{n} > d_1$ <b>then</b>	$\mathcal{X}_{\text{foot}}$ : pose du marqueur du pied
<b>while</b> $ X_{\text{foot}}^b - X_{\text{com}}  > d_2$ <b>do</b>	$X_{\text{foot}}^a$ : pose du pied libre
$\Delta X_{\text{com}} = X_{\text{com}}^b - X_{\text{com}}$	$X_{\text{foot}}^b$ : pose du pied d'appui
<b>if</b> $\ \Delta X_{\text{com}}\  > \delta_{\text{max}}$ <b>then</b>	$X_{\text{com}}$ : position du CdM
$\Delta X_{\text{com}} = \frac{\Delta X_{\text{com}}}{\ \Delta X_{\text{com}}\ } \delta_{\text{max}}$	$X_{\text{com}}^{\text{ref}}$ : position de référence du CdM
<b>end if</b>	$\delta_{\text{max}}$ : seuil de saturation
$X_{\text{com}}^{\text{ref}} += \Delta X_{\text{com}}$	$\mathbf{n}$ : normale du contact
<b>end while</b>	$d_1 = 0.05 \text{ m}$ dans notre cas
<b>end if</b>	$d_2$ petit

---

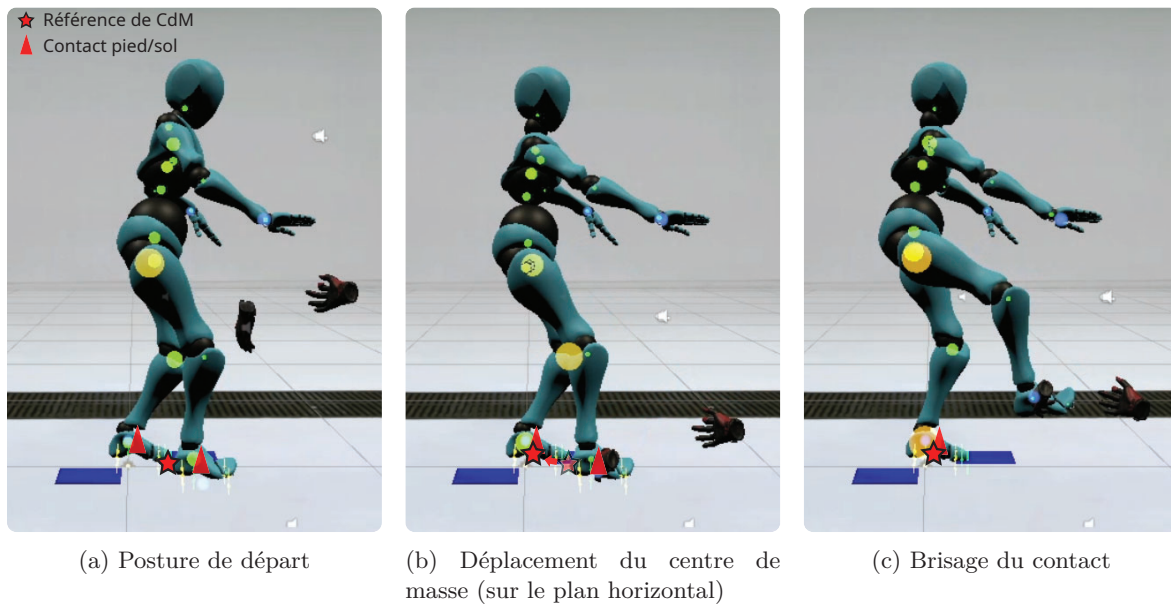


FIGURE 4.4 – Phases du brisage d'un contact entre le pied et le sol. (a) Lorsque l'utilisateur veut déplacer le pied de l'humain virtuel, le contact n'est pas immédiatement brisé. (b) La référence de la tâche de centre de masse est déplacée vers le prochain pied d'appui. (c) Lorsque le centre de masse a atteint la position désirée, le contact est brisé.

**Contacts mains-environnement** Dans la simulation physique, si un contact surfacique est détecté entre une main et un objet du poste de travail, la tâche de contact correspondante est ajoutée dans le contrôleur QP. On considère qu'un contact surfacique doit être activé si la détection de collision trouve au moins trois points suffisamment proches entre les deux surfaces concernées. Pour ajuster la force d'appui, l'utilisateur en RV peut attraper la pointe d'une flèche 3D positionnée sur l'objet et modifier la longueur de la flèche. La force d'appui est proportionnelle à la longueur de la flèche ; les forces mesurées et de référence sont affichées sur la flèche. Comme pour les contacts pieds/sol, l'utilisateur peut supprimer le contact en éloignant suffisamment le marqueur cartésien de la surface d'appui.

**Perturbations extérieures** L'utilisateur peut attraper des objets virtuels ayant une masse et une géométrie de collision pour appliquer des perturbations ponctuelles sur l'humain virtuel. Ce mode d'interaction permet à l'utilisateur de tester la robustesse de l'équilibre de l'humain virtuel face à des forces extérieures, et d'en observer l'effet sur les couples articulaires et la posture de l'humain. Une amélioration future consisterait à pouvoir ajouter des forces ponctuelles directement sur l'humain virtuel en réalité virtuelle. Cela permettrait de visualiser rapidement l'effet de charges supplémentaires, par exemple sur les mains ou bien sur les épaules.

#### 4.2.2.3 Visualisation de l'ergonomie

L'utilisateur peut observer les postures et les couples articulaires de l'humain virtuel pour avoir une idée du risque ergonomique.

L’observation des postures de l’humain virtuel est facilitée par l’interface en réalité virtuelle. L’utilisateur en immersion peut se déplacer et se téléporter librement dans le poste de travail simulé, pour observer l’humain virtuel et les postures générées sous tous les angles. L’utilisateur en réalité virtuelle profite du fait qu’en immersion, la perception d’objet 3D (ici, les dimensions du poste de travail en relation à celles de l’humain virtuel) est améliorée.

Les couples articulaires de l’humain virtuel sont représentés par des sphères colorées (allant du vert au rouge) et situées sur chaque articulation. L’aspect graphique d’une sphère dépend de la valeur du couple articulaire correspondant : plus le couple articulaire est élevé, plus la sphère est grande et devient rouge. Un nuanceur (ou *shader*) est utilisé pour permettre de visualiser ces sphères en surbrillance, depuis n’importe quel angle de vue.

Les couples visualisés sont normalisés par rapport aux limites en couples pour un humain de morphologie moyenne (voir [section A.1](#) en annexe). Les valeurs sont filtrées avec une moyenne glissante sur 10 pas de temps côté client (soit environ 600 ms). En effet, lorsque l’humain virtuel se retrouve dans des configurations instables (par exemple proche de la chute ou proche des limites en couples), des oscillations sur la commande en couples peuvent survenir. Le filtrage permet d’éviter un clignotement excessif des sphères colorées. De plus, seul le couple normalisé le plus élevé est affiché lorsqu’une articulation comporte plusieurs degrés de liberté. Cela permet de mettre en évidence des valeurs en couples proches des limites et associées à un risque ergonomique accru selon les études épidémiologiques ([sous-section 2.1.2](#)).

## 4.3 Cas d’usage

Cette section présente un cas d’usage pour illustrer l’utilisation de l’outil proposée dans un contexte d’évaluation ergonomique.

### 4.3.1 Description du cas d’usage

En réalité virtuelle, l’utilisateur doit configurer la posture de l’humain virtuel pour atteindre plusieurs cibles de hauteurs différentes. L’expérience est réalisée sur plusieurs morphologies différentes afin d’analyser l’influence de la morphologie en termes d’ergonomie.

#### 4.3.1.1 Dispositifs matériels et logiciels

L’approche proposée est implémentée dans la simulation d’humains virtuels présentée dans le chapitre précédent (voir [chapitre 3](#)). L’utilisateur porte un casque de réalité virtuelle grand public à 6 DDLs (Meta Quest 2). L’ensemble des calculs liés à la simulation se fait sur un ordinateur séparé. Le casque est relié à l’ordinateur et ne fait qu’afficher la vue et envoyer les entrées utilisateurs (suivi de mouvement, activation d’un mode d’interaction, etc.) à l’interface cliente Unity.

La figure [4.5](#) montre la configuration initiale des objets de la scène virtuelle par rapport au repère origine  $R_0$ . Le mannequin est initialement positionné au-dessus de  $R_0$  en T-pose ; c’est-à-dire que la projection au sol de la position initiale du bassin coïncide avec l’origine du repère  $R_0$ . L’étagère est placée devant l’humain virtuel (selon l’axe +X).

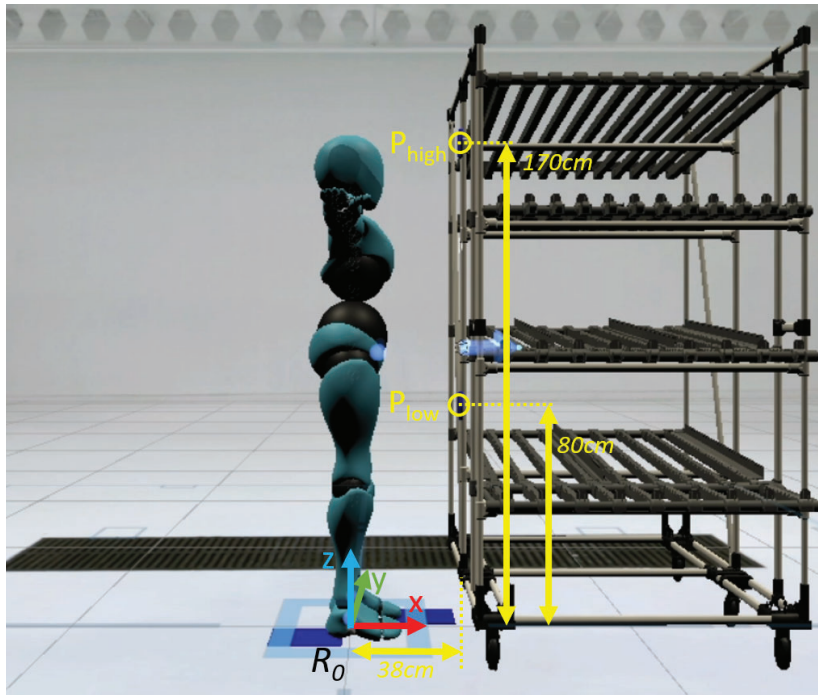


FIGURE 4.5 – Vue de côté du poste de travail virtuel pour le cas d'usage présent. Le mannequin est initialement en T-pose avec l'étagère situé 38 cm vers l'avant (selon l'axe +X).

#### 4.3.1.2 Procédure expérimentale

Dans cette expérience, l'utilisateur cherche à tester l'influence de la morphologie et de la hauteur de cible sur l'ergonomie d'un poste de travail.

**Configurations** Trois morphologies différentes d'humain virtuel sont utilisées : un individu de petite taille  $m_{\text{small}}$  (160 cm, 55 kg), de taille moyenne  $m_{\text{avg}}$  (170 cm, 65 kg) et de grande taille  $m_{\text{tall}}$  (180 cm, 75 kg). Deux cibles sont positionnées sur la face avant de l'étagère et sur le même axe vertical, mais à deux hauteurs différentes  $P_{\text{low}}$  et  $P_{\text{high}}$ . Par rapport au repère  $R_0$ , la cible basse a pour coordonnées  $P_{\text{low}} = (0.38, -0.1, 0.8)$  et  $P_{\text{high}} = (0.38, -0.1, 1.7)$

**Déroulement de l'activité** Pendant toute la durée de l'expérience, l'utilisateur est en immersion dans le poste de travail virtuel modélisé à taille réelle. L'utilisateur doit interagir avec l'humain virtuel et le guider pour qu'il réalise l'activité simulée. Les étapes suivantes doivent être suivies par l'utilisateur :

1. le positionnement des pieds du mannequin. Par rapport aux positions initiales des pieds, l'utilisateur avance le pied gauche du mannequin de  $x_{lf} = 25 \text{ cm}$  et recule le pied droit de  $x_{rf} = 15 \text{ cm}$ . L'utilisateur peut se positionner librement autour du mannequin pour le manipuler.
2. le positionnement de la main droite du mannequin sur la cible basse ( $P_{\text{low}}$ ). L'utilisateur doit amener la main droite sur la cible et dans la bonne orientation afin qu'il y ait un contact plan-plan entre la main et l'étagère.
3. le réglage de la force de poussée sur la cible. L'utilisateur doit ajuster la force de référence du contact, jusqu'à ce que la force mesurée sur la cible soit égale à 80 N.
4. le repositionnement de la main sur la cible haute ( $P_{\text{high}}$ ). L'utilisateur doit éloigner suffisamment le marqueur cartésien de la surface de contact pour briser le contact

Cette procédure est répétée pour chacune des trois morphologies de taille différente.

### 4.3.2 Evaluation ergonomique

#### 4.3.2.1 Métrique d'évaluation

Plusieurs métriques d'évaluations possibles ont été présentées précédemment et pourraient être utilisées (voir [sous-section 2.2.3](#)). De manière classique, l'évaluation se base principalement sur l'observation des postures de l'humain avec des indicateurs de type RULA. Avec la simulation physique, il est possible d'avoir accès à des quantités qui représentent de manière plus détaillée les efforts en jeu, sous la forme des couples articulaires.

Pour notre cas d'usage, l'évaluation ergonomique se base sur un indicateur biomécanique calculé à partir des couples normalisés. Pour un pas de temps donné, cet indicateur noté  $I_\tau$  se calcule de la manière suivante :

$$I_\tau = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \left( \frac{\tau_j}{0.15 * \tau_j^{\max}} \right)^2 \quad (4.1)$$

avec  $\tau_j$  le couple mesuré de l'articulation  $j$ ,  $\tau_j^{\max}$  la capacité maximale en couple pour l'articulation  $j$  et  $N$  le nombre d'articulations. Le couple maximal  $\tau_j^{\max}$  est redimensionné d'un facteur 0.15 qui fait référence à la limite d'endurance introduite dans (WALTER, 1973). Cette limite est définie à l'origine comme un pourcentage de capacité musculaire en dessous duquel le muscle ne se fatigue pas. Ici, l'indicateur  $I_\tau$  est calculé au moment où le mannequin pousse sur la cible avec la force souhaitée (80 N) et de manière stable.

Enfin, pour rendre plus lisible les résultats, des groupes articulaires sont définis et regroupent les DDLs suivants :

- le torse (11 DDLs) avec les articulations des lombaires (*Lumbar Spine*), du thorax (*Thoracic Spine*), du cou (*Neck*) et de la tête (*Head*).
- les bras gauche et droit (5 DDLs chacun) avec la clavicule (*Clavicular*) et l'épaule (*Shoulder*).
- les mains gauche et droite (5 DDLs chacun) avec le coude (*ForeArm*) et le poignet (*Hand*).
- les jambes gauche et droite (8 DDLs chacun) avec la hanche (*Thigh*), le genou (*Leg*), la cheville (*Ankle*) et les orteils (*Toes*).

Le coût  $I_{\tau,g}$  pour un groupe  $g$  reprend la formule de  $I_\tau$  (4.1) mais en se limitant aux articulations appartenant au groupe.

#### 4.3.2.2 Variabilité sur la configuration de l'humain virtuel

Un problème lié à cette procédure expérimentale est que l'utilisateur configure différemment l'humain virtuel d'un cas à l'autre, ce qui peut rendre la comparaison peu pertinente entre les différents cas.

Le [tableau 4.2](#) montre les écarts observés sur certaines variables liées à la configuration de l'humain virtuel, au moment où les couples articulaires sont mesurés. La mise en posture du mannequin physique est effectuée manuellement par l'utilisateur en réalité virtuelle. Le positionnement des contacts ou la force d'appui désirée peuvent varier selon la précision de l'utilisateur, qui est elle-même liée à la précision du suivi des manettes du dispositif de réalité virtuelle. Il est aussi possible que le contact entre un pied d'appui et le sol glisse durant le mouvement à cause de la force d'appui sur les cibles.

	$z_{\text{hand}}$ (cible basse)	$z_{\text{hand}}$ (cible haute)	$x_{\text{hand}}$	$y_{\text{hand}}$	$x_{\text{lf}}$	$x_{\text{rf}}$	$F_{\text{hand}}$
Min	0,825	1,62	0,382	-0,127	0,182	-0,214	79,9
Max	0,843	1,64	0,383	-0,0898	0,200	-0,183	80,1

TABLE 4.2 – Intervalles de valeurs pour les forces de poussée (en Newton) et la position des pieds et des mains (en mètres), pour l'ensemble des cas testés.  $(x_{\text{hand}}, y_{\text{hand}}, z_{\text{hand}})$  correspond à la position cartésienne de la main droite dans le repère de simulation.  $x_{\text{lf}}$  (respectivement  $x_{\text{rf}}$ ) correspond à la position du pied gauche (resp. pied droit) selon l'axe +X du repère de simulation.  $F_{\text{hand}}$  représente la force appliquée par la main droite de l'humain virtuel, sur le pas de temps où les couples articulaires sont mesurés.

Sur chacune des variables (tableau 4.2), l'intervalle entre le minimum et le maximum est considérée suffisamment faible pour que les différents cas soient comparables.

### 4.3.2.3 Résultats

L'expérience réalisée amène à se poser la question suivante :

Quelle est l'influence de la morphologie et de la hauteur de cible sur les couples articulaires ?

Une hypothèse raisonnable est que les couples articulaires sont moins importants lorsque la hauteur de la cible est adaptée à la taille de l'humain, c'est-à-dire lorsque l'humain de petite taille (resp. grande taille) doit atteindre la cible basse (resp. cible haute).

La figure 4.6 montre les différentes morphologies d'humain poussant sur chacune des cibles ( $P_{\text{low}}, P_{\text{high}}$ ). Les postures ainsi que les couples normalisés (sphères colorées) sont distinctes d'un cas à l'autre. La figure 4.7 donne plus en détails les couples normalisés pour chaque cas et par groupe articulaire.

**Effet sur le haut du corps** Sur la cible basse, les couples augmentent avec la taille pour plusieurs groupes articulaires. Entre  $m_{\text{small}}$  (petite morphologie) et  $m_{\text{tall}}$  (grande morphologie), les couples augmentent de 154,7% sur le dos (*Torso*), de 61,6% pour l'épaule droite (*Right Arm*) et enfin de 151,4% sur la main droite (*Right Hand*, mais valeur absolue faible). En effet, un humain de plus grande taille doit se pencher plus pour atteindre les cibles ce qui occasionne des couples plus importants sur le dos : l'angle du dos (angle entre l'horizontale et le segment reliant le pelvis au cou) passe de 9° (petit) à 18° (grand). De plus, comme on peut le voir sur la figure 4.6, l'humain de grande taille doit tendre le bras plus bas, avec un angle par rapport à la normale au point de contact qui est plus élevé (39° pour  $m_{\text{small}}$  contre 45° pour  $m_{\text{tall}}$ ). Dans cette posture, un bras de levier plus important s'exerce sur l'épaule lorsqu'une force s'applique sur la main. Inversement, pour la cible haute, les couples augmentent lorsque la taille diminue sur les articulations du dos (29,1%) et de l'épaule droite (130,2%) entre  $m_{\text{tall}}$  et  $m_{\text{small}}$ . À cause de la hauteur de cible, la posture est moins ergonomique pour un humain de petite taille, qui doit lever le bras et la tête plus en hauteur. L'angle de l'épaule mesuré par rapport à l'horizontale est de 127° pour  $m_{\text{small}}$ , contre 86° pour  $m_{\text{tall}}$  ; l'angle de la tête par rapport à l'horizontale est de 39° pour  $m_{\text{small}}$ , contre 22° pour  $m_{\text{tall}}$ .

Enfin, pour les articulations du bras gauche (*Left Arm*) et de la main gauche (*Left Hand*), les couples normalisés sont faibles dans tous les cas. Ce résultat est attendu étant donné que le bras gauche n'effectue pas l'activité.

**Effet sur les jambes** Au niveau des jambes (*Left leg, Right leg*), la répartition des couples entre les pieds diffère fortement avec la hauteur de cible. Pour une cible basse, les couples sont relativement équilibrés entre les deux jambes. Cependant, pour la cible haute, les couples sont bien plus élevés pour la jambe droite qui sert d'appui arrière. Avec la hauteur, la force de



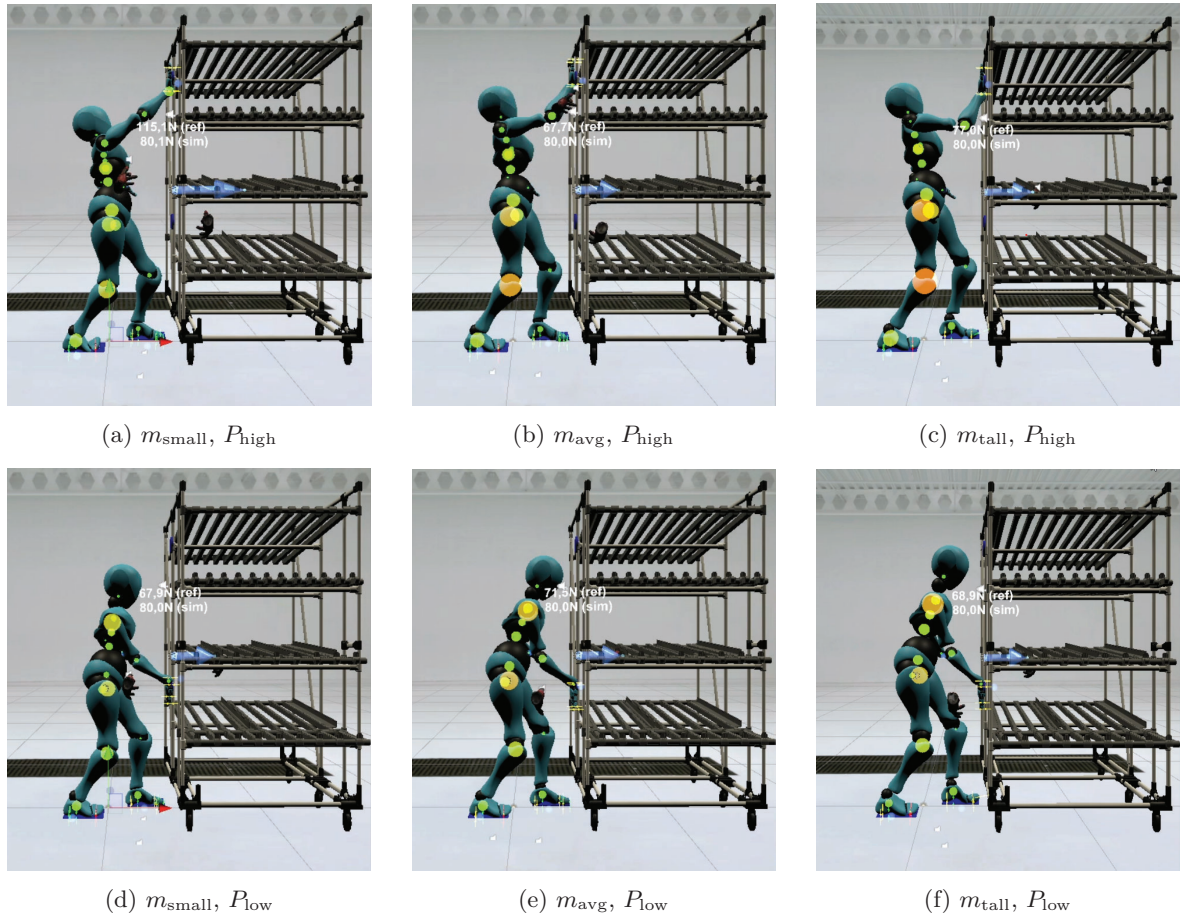


FIGURE 4.6 – Posture de l’humain virtuel pour toutes les combinaisons de morphologie et de hauteur de cible, lorsque la force de poussée mesurée en simulation atteint 80 N.

Morphologie	Cible basse			Cible haute		
	Petite	Moyenne	Grande	Petite	Moyenne	Grande
Torse	0,353	0,468	0,899	0,905	0,914	0,701
Bras droit	1,506	2,203	2,434	0,99	0,826	0,43
Main droite	0,103	0,242	0,259	0,549	0,303	0,493
Jambe gauche	1,413	1,166	1,747	0,362	0,842	2,185
Jambe droite	1,422	1,391	1,722	3,502	4,577	5,693
Bras gauche	0,006	0,009	0,012	0,007	0,012	0,018
Main gauche	0,198	0,259	0,258	0,231	0,31	0,346

FIGURE 4.7 – Valeur de l’indicateur en couples  $I_{\tau,g}$  en fonction de la morphologie, de la hauteur de cible et du groupe articulaire  $g$ . Un gradient de couleur est utilisé, pour mettre en évidence les meilleures valeurs (en vert) et les pires valeurs (en rouge).



réaction sur le contact de la main droite produit un moment plus important faisant basculer le corps vers l'arrière et qui doit être compensé par la jambe en retrait. De plus, les couples normalisés sur les jambes augmentent avec la taille de l'humain, avec 600,0% sur la jambe gauche et 62,6% sur la jambe droite entre  $m_{\text{small}}$  et  $m_{\text{tall}}$ .

### 4.3.3 Discussions

#### 4.3.3.1 Analyse des comportements

Pour répondre à la question liée au cas d'étude (section 4.3), la morphologie et la hauteur de la cible ont un effet observable en termes d'ergonomie pour l'activité étudiée.

Sur le haut du corps, les couples articulaires augmentent avec la taille de l'humain pour la cible basse, mais à l'inverse diminuent avec la taille pour la cible haute. Cette observation est cohérente avec l'idée que la hauteur de travail (ici, la hauteur de la cible) doit être adaptée à la taille de l'humain.

Cependant, sur le bas du corps, les couples augmentent avec la taille de l'humain, avec un effet particulièrement prononcé pour la cible haute. Plusieurs éléments peuvent expliquer cette observation qui va à l'encontre de l'hypothèse énoncée plus tôt (c.-à-d. les couples sont plus faibles lorsque la hauteur de cible est adaptée à la morphologie).

Ce phénomène pourrait s'expliquer par le positionnement des pieds identique pour toutes les morphologies. L'humain de grande taille pourrait potentiellement s'éloigner plus des cibles et augmenter l'écartement des jambes, afin de mieux compenser le bras de levier (occasionné par l'appui main/cible) supplémentaire lié à l'augmentation de la taille. De plus, l'individu de plus grande taille possède une masse plus importante à IMC égal. Plus la taille augmente, plus la masse que les articulations du bas du corps doivent supporter augmente.

Une autre facteur proviendrait ainsi de la non prise en compte de la morphologie pour les capacités maximales en couples. Un individu de plus grande taille (et donc plus lourd à IMC égal) possède en moyenne des capacités musculaires plus élevées (FORD et al., 2000). Dans ce travail, les limites en couples articulaires sont identiques pour les trois morphologies et sont utilisées pour le calcul de l'indicateur ergonomique  $I_{\tau}$ . Pour gagner en précision, il faudrait ajuster les limites en couples articulaires en fonction de la morphologie, sinon les valeurs de couples normalisés sont difficilement comparables d'une morphologie à l'autre. Dans l'état de l'art, il n'existe pas de modèle pour calculer les limites en couples en fonction de caractéristiques morphologiques spécifiques tel que la taille ou la masse. Un modèle pour exprimer les limites en couples articulaires en fonction de la taille et de l'IMC est proposé dans la suite du manuscrit (sous-sous-section 5.3.2.3).

L'humain de morphologie  $m_{\text{tall}}$  pèse plus lourd : le contact main droite produit alors un moment plus important lié à la masse supplémentaire, qui est compensé au niveau de la jambe droite.

#### 4.3.3.2 Utilisabilité de l'outil

:

En termes de configuration matérielle, l'outil nécessite d'utiliser un casque de réalité virtuelle. Il s'agit d'un matériel aujourd'hui accessible et abordable en particulier avec l'arrivée sur le marché de casques performants basés sur le tracking *inside-out* (p. ex. Meta Quest 2). La configuration matérielle devient alors minimale étant donné que le casque et les manettes se positionnent d'eux même dans la scène, sans avoir besoin de capteurs externes.

Dans la scène virtuelle, les marqueurs cartésiens sont placés au niveau de segments de corps manipulés, ce qui donne l'illusion d'attraper directement le segment du corps. Pour l'instant, seuls les mains et les pieds peuvent être manipulés par l'utilisateur. Au niveau du contrôleur QP, il est tout à fait possible d'ajouter des tâches cartésiennes pour d'autres segments de corps afin d'ajuster plus finement la posture du mannequin, par exemple l'orientation de la tête ou la position du bassin. Pour éviter de sur-contraindre le mannequin, chaque tâche cartésienne doit pouvoir être désactivée (ou ré-activée) à la volée. Par exemple sur le cas d'usage, la tâche cartésienne sur la main gauche n'intervient pas dans le scénario et aurait pu être désactivée pour permettre au bras gauche de bouger librement.

Le positionnement des pieds se fait lorsque la physique est activée, ce qui pose des difficultés liées à la gestion de l'équilibre de l'humain virtuel en mode interactif. Pour modifier les appuis au sol, l'humain virtuel doit systématiquement passer par la configuration à un pied d'appui (voir [Algorithme 1](#)). À cause de la gestion statique de l'équilibre, il est difficile de placer le pied libre loin du pied d'appui ; l'écartement possible des jambes est donc limité. Pour des travaux futurs, une approche possible consisterait à désactiver la physique le temps que l'utilisateur configure la position des pieds. L'utilisateur serait alors moins contraint par la physique pour configuration la posture initiale de l'humain virtuel.

Une autre limite notable est la difficulté à manipuler en précision des objets en réalité virtuelle. Ce manque de précision est lié à l'erreur de suivi de la pose des manettes, mais aussi aux mouvements de l'utilisateur. Par exemple, sur le réglage de la force de poussée  $F_{\text{hand}}$ , il est relativement difficile d'ajuster la position de la flèche pour fixer la force de poussée à exactement 80,0 N. Le manque de précision est une limite qui revient souvent pour les outils de mise en posture basée sur la réalité virtuelle (VOGEL et al., 2018). Il s'agit d'un défaut qui peut être corrigé avec une interface utilisateur adaptée (LAMBERTI et al., 2020).

## 4.4 Conclusion

### 4.4.1 Synthèse

Dans le chapitre, l'objectif est d'explorer de nouvelles méthodes pour rendre plus intuitive l'évaluation ergonomique d'un poste de travail, lorsque différentes morphologies doivent être prises en compte. Un focus est fait sur les approches permettant de favoriser l'interaction entre les humains virtuels et un utilisateur souhaitant évaluer l'ergonomie du poste de travail. Dans ce travail, la simulation physique d'humains virtuels et la réalité virtuelle sont utilisées pour répondre aux défis liés aux approches interactives.

D'une part, pour générer des comportements réalistes et en temps interactif, la simulation physique est couplée avec un contrôleur corps-complet pour animer les humains virtuels. Le contrôleur corps-complet expose de nombreux paramètres tels que des poses ou des forces de références. Ces paramètres peuvent être modifiés par l'utilisateur à travers une interface en réalité virtuelle afin de reconfigurer en direct la posture d'humain virtuel.

D'autre part, dans le but d'améliorer la visualisation de l'ergonomie, la réalité virtuelle permet l'immersion de l'utilisateur dans le poste de travail de l'humain virtuel. Ce dernier peut observer les postures et les couples articulaires en trois dimensions et depuis n'importe quel point de vue souhaité.

L'approche proposée est finalement testée sur un exemple d'activité dans lequel l'humain doit appliquer une force précise sur des cibles. Avec cette approche, différentes morphologies d'humain sont mises en posture, et des résultats cohérents sont obtenus en termes de postures et de couples articulaires.

## 4.4.2 Perspectives

La méthode de simulation interactive présentée dans le chapitre ouvre la voie à de nombreuses perspectives d'amélioration et d'application.

Pour l'instant, l'outil reste limité en termes d'interaction et de visualisation. Le chapitre présente principalement une preuve de concept de la combinaison entre la simulation physique d'humains virtuels et l'interaction en réalité virtuelle. Par la suite, d'autres interactions pourraient être implémentées, afin de gérer d'autres comportements sur l'humain virtuel et couvrir un panel plus large de scénario en simulation. Par exemple, en reprenant d'autres travaux basés sur des mannequins physiques, l'humain virtuel pourrait déplacer des charges (GOMES et al., 2022) ou bien interagir avec d'autres systèmes mécaniques tel qu'un robot collaboratif (MAURICE et al., 2017). Cela implique potentiellement de complexifier le contrôleur de l'humain et d'explorer de nouveaux modes d'interaction en réalité virtuelle qui permettent à l'utilisateur une configuration intuitive de l'humain virtuel. De manière plus générale, la question suivante peut être formulée :

### Question 4.1

Comment étendre l'approche interactive proposée à d'autres scénarios et à d'autres comportements de l'humain virtuel ?

Dans ce chapitre, l'outil est testé sur un cas d'usage avec plusieurs morphologies, mais sans validation de l'usage auprès d'ergonomes. Sur une version plus complète de l'outil, des tests utilisateurs pourront par la suite être effectués pour évaluer l'intérêt de l'outil sur des cas concrets, similairement à l'étude utilisateur présentée dans (LAMBERTI et al., 2020). D'un point de vue scientifique, il serait intéressant de déterminer si l'utilisation de l'outil est intuitive et si les résultats font sens d'un point de vue ergonomique. L'expérience porterait sur plusieurs cas d'usage typiques en ergonomie de poste de travail pour vérifier si l'outil se généralise bien à d'autres cas. Le panel d'utilisateurs comprendrait des ergonomes pour évaluer l'intérêt et l'exactitude de l'outil, mais aussi des non-ergonomes pour voir si l'outil permet de rendre l'évaluation ergonomique plus intuitive. Ceci ouvre donc sur la question suivante :

### Question 4.2

Quelle est l'utilisabilité d'outils de conception de poste de travail basée sur la réalité virtuelle dans un contexte d'ergonomie ?

Enfin, dans la discussion (sous-section 4.3.3), il est mentionné que les valeurs de paramètres configurant le mannequin et le contrôleur sont fixées à la main et sont surtout identiques pour toutes les morphologies. Ici, le même contrôleur semble fonctionner, car les morphologies sont relativement proches et la tâche à réaliser est simple. Cependant, pour des morphologies très distinctes (c.-à-d. aux extrémités de la distribution des morphologies dans une population), une configuration unique du contrôleur risque de générer des comportements inadaptés, voire invalides. De plus, pour évaluer l'ergonomie d'un poste de travail pour une morphologie, il ne s'agit pas de générer un comportement quelconque, mais d'obtenir le meilleur comportement possible d'un point de vue ergonomique. Par exemple, pour des paramètres tels que la position des pieds ou le gain des tâches d'asservissement, on peut s'attendre à ce que leurs valeurs dépendent des caractéristiques morphologiques de l'humain virtuel. Si l'on souhaite étendre l'analyse à un plus grand échantillon de morphologies, il n'est

pas envisageable de régler manuellement la configuration du contrôleur pour chaque individu. De plus un contrôleur réglé manuellement a peu de chances d'être optimal. Ceci rejoint l'objet du deuxième sous-problème posé dans l'introduction (**Problème 1.1**), à savoir être capable de générer des comportements adaptés à une large diversité de morphologies. Dans le chapitre suivant (**chapitre 5**), une nouvelle approche sera présentée pour optimiser efficacement les paramètres liés au contrôle de l'humain virtuel et générer des comportements mieux adaptés à chaque morphologie d'humain.

## Chapitre 5

# Adéquation d'un poste de travail à une large population

### Sommaire

---

<b>5.1</b>	<b>Introduction</b>	<b>69</b>
<b>5.2</b>	<b>Génération de comportements adaptés à la morphologie</b>	<b>70</b>
5.2.1	Formalisation du problème	71
5.2.2	Simulation dynamique d'activités	72
5.2.3	Adaptation des comportements	73
<b>5.3</b>	<b>Cas d'usage : activité de vissage</b>	<b>77</b>
5.3.1	Description de l'activité	78
5.3.2	Application de MTME au cas d'usage	79
5.3.3	Expériences et setup de simulation	84
<b>5.4</b>	<b>Adéquation à l'activité de vissage et analyse comportementale</b>	<b>85</b>
5.4.1	Cartes d'adéquation	85
5.4.2	Comportements élités	88
5.4.3	Stratégies motrices	99
5.4.4	Synthèse	101
<b>5.5</b>	<b>Evaluation des performances de l'approche</b>	<b>101</b>
5.5.1	Vitesse de convergence	102
5.5.2	Optimalité des solutions	105
<b>5.6</b>	<b>Conclusion</b>	<b>109</b>

---

### 5.1 Introduction

Dans le chapitre précédent, un outil a été proposé pour rendre plus intuitive la manipulation d'humains virtuels et à rendre plus interactive et immersive l'évaluation ergonomique. D'après les études épidémiologiques (CHAFFIN et al., 2000), la manière d'effectuer une activité peut varier de manière significative d'un individu à l'autre à cause de la morphologie. Cependant, l'outil proposé, le contrôleur corps-complet est configuré de la même manière pour les trois morphologies simulées (petite, moyenne et grande). De plus, l'étude ergonomique se fait sur un pas de temps et non sur l'ensemble du mouvement de l'humain virtuel : entre deux postures statiques correctes, les postures intermédiaires peuvent être mauvaises en termes

d'ergonomie. En outre, la posture de l'humain virtuel est ajustée par l'utilisateur en réalité virtuelle avec un point de vue extérieur : dans tous les cas, les trajectoires intermédiaires ne correspondent pas à ce que ferait un humain réel.

Dans ce chapitre, l'objectif est d'évaluer si un poste de travail industriel est adapté ou non à une large population, c'est-à-dire à un grand nombre de morphologies différentes.

Un premier problème consiste à pouvoir générer des comportements morpho-spécifiques, c'est-à-dire adaptés à chaque individu en termes de performance et d'ergonomie. Pour déterminer si l'activité est adaptée à la morphologie, la variabilité du comportement doit être prise en compte. En effet, si un individu est capable d'effectuer une activité, il existe potentiellement une infinité de comportements possibles lui permettant d'y arriver. Dans cet espace de comportements valides, certains comportements sont probablement plus ergonomiques que d'autres pour réaliser l'activité. Cette optimisation sur l'espace des comportements est un problème classiquement résolu par des algorithmes évolutionnaires de type « boîte noire », comme dans (PENCO et al., 2020) ou (GOMES et al., 2022). En effet, il est difficile d'exprimer la relation entre les paramètres pouvant influencer le comportement (par exemple les paramètres du contrôleur corps-complet) et le comportement en lui-même. De plus, la fonction à optimiser, qui caractérise la qualité du comportement, est fortement discontinue, notamment lorsque des changements de contacts ont lieu ou en cas de perte d'équilibre et de chute de l'humain virtuel.

Un deuxième problème concerne le coût computationnel nécessaire pour répondre à l'objectif énoncé, c'est-à-dire évaluer l'adéquation d'un poste de travail pour une large population d'humains. Les méthodes d'optimisation basées sur des algorithmes évolutionnaires requièrent en général une quantité importante de simulations pour optimiser le paramétrage du contrôleur pour une seule morphologie (PENCO et al., 2020). L'optimisation du comportement doit être effectuée pour chaque morphologie : le coût computationnel devient alors un facteur critique. Il semble donc nécessaire de s'orienter vers des méthodes permettant de diminuer le nombre de simulations pour espérer converger vers un ensemble de solutions satisfaisantes.

Dans la suite du chapitre, nous présentons une approche pour répondre aux deux problèmes énoncés (c.-à-d. la génération de comportements morpho-spécifiques et le coût computationnel). Après avoir posé formellement le problème à résoudre, la méthode est introduite et consiste à coupler la simulation physique d'humains virtuels avec un algorithme d'optimisation multi-tâches (section 5.2). Pour démontrer notre méthode, les comportements ont été optimisés pour une population de 100 humains de morphologies différentes sur une activité de vissage (section 5.3). Dans les résultats, l'adéquation du poste de travail sur l'ensemble de la population est évaluée et l'influence de la morphologie sur le comportement est étudié (section 5.4). Enfin, les performances de l'approche proposée sont évaluées (section 5.5).

## 5.2 Génération de comportements adaptés à la morphologie

Pour générer des comportements adaptés à chaque morphologie, la méthode proposée comporte deux parties. Dans la partie « simulation d'activité » (sous-section 5.2.2), la simulation physique d'humains virtuels présentée dans le chapitre 3 est utilisée pour simuler différentes morphologies sur des postes de travail. Dans la partie « adaptation comportementale » (sous-section 5.2.3), un algorithme multi-tâches basé sur l'optimisation *Quality-Diversity* (MOURET et al., 2020) est utilisé pour trouver de manière efficace des comportements adaptés à chaque morphologie. La figure 5.1 donne une vue d'ensemble de l'approche.

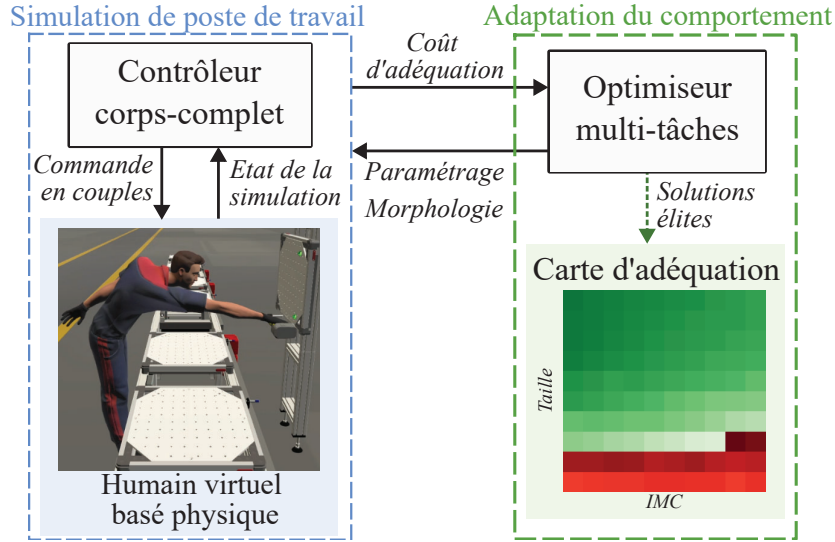


FIGURE 5.1 – Fonctionnement général de l’architecture proposée. La simulation physique d’humains virtuels (chapitre 3) est utilisée pour simuler différentes morphologies de travailleurs sur une activité industrielle. Pour générer des comportements morfo-spécifiques, un algorithme d’optimisation multi-tâches explore de manière efficace des paramétrages du contrôleur de l’humain, en optimisant un coût d’adéquation. Après une quantité suffisante d’évaluations, la qualité d’un poste de travail peut être analysée avec la carte d’adéquation ainsi que l’ensemble des comportements optimisés générés.

### 5.2.1 Formalisation du problème

On souhaite déterminer si une activité  $a$  est adaptée pour une population d’humains  $\mathcal{M}$  (*Morphologies*). L’activité est considérée comme adéquate pour une population si tous les individus sont capables de réaliser l’activité avec un risque ergonomique suffisamment faible. Or, pour une même activité et pour une même morphologie, il existe de nombreuses manières d’effectuer l’activité. Cette variabilité de mouvements est principalement liée à la redondance mécanique élevée du corps humain. L’ensemble de ces comportements possibles pour un individu  $m \in \mathcal{M}$  sur une activité  $a$  est noté  ${}_a\mathcal{B}_m$  (ou plus simplement  $\mathcal{B}_m$ , pour *Behaviors*).

Le problème consiste à trouver un comportement optimal  $b_m^* \in \mathcal{B}_m$  pour chaque individu par rapport à un coût d’adéquation  ${}_a f_{suit}^m$  (*Suitability Cost*). Le coût d’adéquation définit une métrique qui permet de quantifier l’adéquation de l’activité à la morphologie  $m$  en se basant sur le comportement généré. Dans ce chapitre, le but est de trouver le comportement permettant d’effectuer l’activité de manière la plus ergonomique possible. Ainsi, le coût  ${}_a f_{suit}^m$  doit dépendre de critères de performance et d’ergonomie. Cette optimisation du comportement doit être effectuée pour tous les individus de la population  $\mathcal{M}$ . Cela implique donc de résoudre le problème d’optimisation suivant :

$$\forall m \in \mathcal{M} \quad b_m^* = \arg \min_{b_m \in \mathcal{B}_m} {}_a f_{suit}^m(b_m) \quad (5.1)$$

Pour simplifier les notations futures, le coût d’adéquation sera noté  $f_{suit}$  au lieu de  ${}_a f_{suit}^m$ .

Il s’agit d’un problème difficile à optimiser. Pour une seule morphologie, l’espace des comportements possibles est infiniment grand et une recherche exhaustive n’est donc pas envisageable. Il est alors nécessaire d’utiliser des méthodes permettant d’explorer de manière efficace l’espace des comportements possibles  $\mathcal{B}_m$  à travers les morphologies. Pour explorer  $\mathcal{B}_m$ , il faut d’abord parvenir à générer ces comportements. Une idée générale consiste à



définir puis optimiser des paramètres liées à l'animation de l'humain virtuel qui permettant de couvrir au mieux l'espace des comportements  $\mathcal{B}_m$ . La suite du chapitre présente les choix techniques pour répondre à ce problème.

## 5.2.2 Simulation dynamique d'activités

### 5.2.2.1 Types d'activités

Dans la suite du chapitre, nous nous focalisons sur des activités manuelles dans des postes de travail industriels. Un scénario définit une séquence courte d'actions à effectuer dans un ordre précis et avec possiblement des délais temporels prédéfinis. Parmi les actions possibles, l'humain virtuel peut attraper et reposer un objet, typiquement des outils ou des pièces détachées. Il peut atteindre des cibles (pour faire du vissage, déplacer un objet, etc.) ou bien suivre une trajectoire de référence (pour faire du ponçage ou de la peinture). Pour simplifier la simulation, l'humain virtuel ne peut pas marcher ou s'appuyer volontairement sur une surface du poste de travail (c.-à-d. les contacts sont fixes).

### 5.2.2.2 Configuration du contrôleur QP

Pour animer l'humain virtuel dans la simulation physique, le contrôleur corps-complet présenté précédemment (voir [section 3.3](#)) est utilisé. L'ensemble des tâches et contraintes du contrôleur QP permettant de simuler des activités manuelles est présenté ci-après.

#### *Tâches QP*

- **Tâche de centre de masse (CdM)**, afin de permettre à l'humain virtuel de rester en équilibre. La référence du CdM est fixée par défaut au centre du polygone de support mais sa position précise peut être optimisée en fonction de la morphologie.
- **Tâche cartésienne sur la main** qui définit comment l'activité doit être effectuée, avec par exemple une trajectoire de référence sur la main ou sur l'outil manuel. Dans ces travaux, ces trajectoires sont générées à partir de points de passage, avec une interpolation polynomial de type *minimum-jerk* (jerk minimal) (FLASH et al., 1985).
- **Tâche cartésienne sur l'orientation de la tête** pour que l'humain garde la vision sur ses actions. L'orientation de référence de la tête est dirigée vers la main qui réalise la tâche.
- **Tâche posturale** pour chacun des groupes articulaires suivants : torse, bras droit, bras gauche, jambes. La posture de référence est la posture debout neutre (N-pose) : l'humain est debout et droit, avec les mains le long du corps. Cette posture est la posture ergonomique de référence utilisée dans l'indicateur ergonomique REBA (HIGNETT et al., 2000). Le réglage de chaque tâche posturale (en termes de poids, de gains) détermine à quel point les groupes articulaires concernés peuvent s'éloigner de la posture ergonomique de référence.
- **Tâche de minimisation des couples articulaires**, avec un poids faible, pour éviter si possible de générer des efforts internes élevés.

#### *Contraintes QP*

- **Contacts surfaciques** pour garantir le non-glissement des contacts entre les pieds et le sol.

- **Limites articulaires** en position, vitesse, accélération et en couples pour modéliser les limites physiques de l'humain virtuel. Pour les valeurs limites en position et en vitesse, des valeurs moyennes issues de la littérature en biomécanique sont utilisées (CHAFFIN et al., 2006). À noter que ces valeurs limites peuvent varier d'un individu à l'autre, selon la forme physique, la flexibilité, etc. Pour les couples articulaires, ces valeurs limites sont liées aux capacités musculaires et sont d'autant plus variables d'un individu à l'autre, selon le niveau d'activité physique. Ces limites en couples sont des caractéristiques morphologiques dont l'influence en termes d'ergonomie peut être analysé à travers la simulation. Dans la suite du chapitre, un modèle est proposé pour estimer les capacités en couples articulaires en fonction de la taille et le poids de l'individu (sous-sous-section 5.3.2.3).

Le contrôleur QP fournit une paramétrisation explicite des tâches et contraintes permettant d'ajuster le comportement de l'humain virtuel. La suite de la section montre comment tirer partie de cette configurabilité du contrôleur pour adapter le comportement à la morphologie de chaque individu.

### 5.2.3 Adaptation des comportements

Le simulateur physique permet de générer des comportements cohérents vis-à-vis de la physique pour une variété de morphologies. Parmi les comportements possibles, des comportements morpho-spécifiques doivent être trouvés de manière efficace pour l'ensemble de la population. Pour cela, l'algorithme Multi-Task MAP-Elites (MOURET et al., 2020) est choisi pour résoudre notre problème, parmi les approches existantes en optimisation.

#### 5.2.3.1 Approches en optimisation

Dans cette partie, nous présentons les approches existantes en optimisation pour trouver efficacement (c.-à-d. avec un coût computationnel réduit) des solutions performantes, pour un grand nombre d'individus distincts.

**Optimisation Quality-Diversity** L'optimisation *Quality-Diversity* est une approche émergente (LEHMAN et al., 2011 ; MOURET et al., 2015) dans la communauté des algorithmes évolutionnaires et ayant trouvé des applications dans divers domaines : en robotique, en jeux vidéos, en ingénierie, etc. En optimisation *Quality-Diversity*, l'objectif est de trouver des solutions performantes pour une diversité de niches. Cette approche s'inspire de processus évolutifs observés dans la nature. Dans un écosystème, différentes espèces apparaissent au fil des générations et se spécialisent dans leur niche écologique respective.

Les premiers travaux sur l'optimisation QD remontent aux travaux de LEHMAN et al. (2011) avec l'algorithme NSLC (*Novelty Search with Local Competition*) où le but était de générer une diversité de créatures pour une activité de locomotion. L'algorithme se base sur un optimiseur multi-objectif pour trouver le meilleur compromis entre d'une part la recherche de nouveauté et l'exploration de l'espace des morphologies (*Novelty Search*) ; et d'autre part la performance locale au sein d'une niche (*Local Competition*). L'approche est limitée par la couverture relativement restreinte sur l'espace des morphologies.

(MOURET et al., 2015) introduisent MAP-Elites (Multi-dimensional Archive of Phenotypic Elites) qui permet de trouver des solutions performantes pour une proportion significativement plus importante de l'espace des niches (ou *Behavioral Space*). Le principe général de l'algorithme consiste à maintenir une archive des meilleures solutions (ou élites) et à croiser les élites pour espérer améliorer les élites existantes tout en découvrant de nouvelles niches.

Cette archive d'élites est définie comme une grille en plusieurs dimensions sur l'espace des niches. À l'issue de l'optimisation, il est possible de visualiser la fonction de coût dans l'espace des niches, typiquement sous forme de cartes en 2 dimensions.

Avec MAP-Elites, un accent est mis sur la découverte des niches. Ainsi, lorsqu'une solution est évaluée, la niche exprimée par cette solution n'est pas connue à l'avance. Il y a un risque que certaines niches ne soient pas du tout explorées, à cause du chemin évolutif ou bien de sa relative rareté. Dans le problème posé (équation 5.1), chaque niche correspond à une morphologie, et plus précisément, au comportement associé à la morphologie. Cependant, pour répondre au problème, les comportements de toutes les morphologies étudiées doivent être optimisés. L'optimisation Multi-Tâches pourrait répondre à ce problème.

**Optimisation Multi-Tâches** L'optimisation (ou apprentissage) multi-tâches est une approche récente (GUPTA et al., 2016) permettant de répondre à diverses problématiques de transfert de connaissances, lorsqu'il y a des contraintes sur la quantité de données ou de puissance de calcul disponibles. En effet, en optimisation multi-tâches, l'objectif est de résoudre simultanément plusieurs problèmes d'optimisation distincts. L'idée principale est qu'une solution optimale pour un problème peut apporter des éléments de réponses sur d'autres problèmes en lien. L'approche vise à réduire le temps de calcul global nécessaire en évitant d'optimiser chaque problème à partir de zéro. De plus, en incorporant des connaissances provenant d'autres problèmes, chaque solution est plus en mesure de généraliser et de prendre en compte des caractéristiques intrinsèques communes à différents problèmes.

Les travaux précurseurs de GUPTA et al. (2016) introduisent un algorithme d'optimisation Multi-Factorielle (MFO), pour optimiser simultanément plusieurs problèmes. L'approche considère une population de solutions (ou individus) ; à chaque génération, des solutions parentes sont sélectionnées et croisées pour générer des solutions filles qui sont évaluées sur un problème approprié. La sélection des parents et du problème dépend du classement de chaque individu, au sein de chaque problème. Dans les travaux de LI et al. (2018), plusieurs populations de solutions sont utilisées, avec une population par sous-problème. De manière générale, un algorithme d'optimisation multi-tâches à plusieurs populations alterne entre deux mécanismes d'évolution : en croisant des solutions provenant de la même population (*Self Evolution*) ou bien de populations différentes (*Cross-Task Evolution*). Ces algorithmes d'optimisation sont conçus pour être génériques et applicables pour des ensembles de tâches (c.-à-d. problème dans ce contexte) potentiellement très distinctes, ce qui pose des défis (WEI et al., 2022). D'une part, les tâches à croiser doivent être choisies de manière pertinente : si deux tâches sont trop éloignées, alors un partage de connaissances pourrait être une perte de temps. Il faut pouvoir mesurer la similitude entre les tâches à l'aide de métriques de distance. Une autre approche consiste à estimer l'affinité entre les tâches en se basant sur l'historique des échanges génétiques : deux tâches ayant un historique d'échanges positifs auront plus de chances d'être sélectionnées. D'autre part, des tâches différentes peuvent définir des espaces de recherche différents. Il faut ainsi pouvoir transférer des solutions d'un espace vers un autre, en transformant les solutions dans l'espace de départ à l'aide des informations sur la distribution des solutions, ou en trouvant directement une fonction de correspondance entre les deux domaines.

**Multi-Task MAP-Elites** Pour exploiter les avantages des deux approches précédemment citées, l'algorithme Multi-Task MAP-Elites a été introduit par MOURET et al. (2020). Il s'agit d'un algorithme d'optimisation multi-tâches qui permet de trouver efficacement une diversité de bonnes solutions pour une multitude de tâches (c.-à-d. problèmes). L'intuition générale

derrière cette approche est de pouvoir réutiliser les bonnes solutions d’une morphologie sur d’autres morphologies proches, pour réduire le coût global et éviter d’optimiser pour chaque morphologie depuis zéro.

Multi-Task MAP-Elites (MTME) reprend les notions principales introduites dans MAP-Elites (MOURET et al., 2015). L’algorithme utilise une archive pour stocker les solutions élites (c.-à-d. meilleures solutions), qui sont définies dans un espace de recherche (*Search Space*) de dimension élevée. À la différence de MAP-Elites, chaque élément de l’archive est une tâche à optimiser et prédéfinie à l’avance ; l’archive doit contenir un nombre suffisamment élevé de tâches distinctes afin de maintenir une diversité génétique parmi les solutions élites.

À l’initialisation de MTME, des solutions aléatoires sont évaluées sur une partie des tâches. Ensuite, à chaque itération, deux tâches parentes sont sélectionnées aléatoirement. Des opérateurs génétiques (mutations, crossovers) sont appliqués sur les solutions élites correspondantes pour générer une solution fille. Plusieurs stratégies existent pour choisir la tâche sur laquelle évaluer la solution fille. La sélection peut se faire de manière aléatoire, pour éviter d’ajouter un biais de sélection dans le processus d’optimisation, mais au risque d’augmenter le nombre d’évaluations nécessaires si une hypothèse pertinente existe. (MOURET et al., 2020) proposent de sélectionner des tâches proches des tâches parentes, à l’aide d’un tournoi. L’hypothèse derrière ce choix est que des problèmes proches présentent des solutions proches. Le tournoi consiste à prendre un sous-ensemble aléatoire de tâches, puis d’y sélectionner la tâche la plus proche des parents. La taille du tournoi a une influence significative sur la convergence de l’algorithme ; le choix de la taille est posé comme un problème de bandit à K bras et résolu avec l’algorithme UCB (*Upper-Confidence Bound*) (AUER et al., 2002).

L’algorithme permet donc de résoudre un problème d’optimisation multi-tâches tout en héritant des points forts de MAP-Elites, c’est-à-dire la visualisation de la fonction de coût dans l’espace des tâches et la recherche de solutions performantes pour une grande variété de tâches.

### 5.2.3.2 Application de MTME au problème de thèse

Dans ces travaux, l’objectif est d’étudier l’adéquation d’un poste de travail pour une large population d’individus. Pour cela, le comportement le plus adéquat pour chaque morphologie doit être trouvé (sous-section 5.2.1) et avec un coût calculatoire raisonnable.

Pour répondre à ces problèmes, Multi-Task MAP-Elites est donc utilisé. Chaque *Task* correspond à optimiser le comportement d’une morphologie. Les principales étapes de MTME appliqué à notre problème sont décrites dans le pseudo-code suivant (Algorithme 2).

---

**Algorithme 2** Pseudo-code simplifié pour Multi-task MAP-Elites (MOURET et al., 2020) appliqué à notre problème.

---

```

Archive ← Générer et évaluer  $N_{random}$  solutions aléatoires sur des morphologies aléatoires.
for K évaluations do
   $x$  ← Générer une solution à partir de deux élites de l’archive.
   $m$  ← Sélectionner une morphologie  $m \in \mathcal{M}$ .
   $b$  ← Simuler l’activité avec la solution  $x$  pour la morphologie  $m$ 
  if  $f_{suit}(b) < Archive(m)$  then
     $Archive(m) = f_{suit}(b)$ 
  end if
end for

```

---

**Espace des tâches MTME** L'espace des tâches (au sens de MTME) correspond à l'ensemble des morphologies considérées dans le problème. Chaque dimension de cet espace correspond à une caractéristique morphologique de l'ouvrier.

L'espace des tâches comporte typiquement un nombre réduit de dimensions. Un nombre élevé de dimensions entraîne une explosion du nombre de sous-problèmes à optimiser (malédiction de la dimension). De plus, l'intérêt de MTME est de pouvoir visualiser le paysage de la fonction de coût sur un espace de dimension plus faible (c.-à-d. l'espace des tâches). En particulier, le coût d'adéquation pourrait être visualisé en fonction des caractéristiques morphologiques précises, sur des cartes en deux dimensions. Cela donnerait une vue globale et directe de l'effet des caractéristiques morphologiques sur l'adéquation d'un poste de travail.

**Espace de recherche** L'espace de recherche définit l'ensemble des solutions que MTME peut explorer. Chaque dimension de cet espace correspond à un paramètre qui peut influencer de manière significative le comportement de l'humain virtuel. Par exemple, un paramètre peut jouer sur la configuration initiale de l'humain virtuel, sur les (nombreux) paramètres exposés par le contrôleur corps-complet ou bien sur les positions et les trajectoires de référence. L'ensemble des paramètres optimisés par MTME doit être choisi de telle sorte qu'une diversité de comportements puissent être générés pour chacune des morphologies étudiées.

Un avantage de MTME (et de MAP-Elites en général) est que l'optimisation fonctionne pour des espaces de recherche de dimension élevée (plusieurs dizaines) (MOURET et al., 2015). L'augmentation du nombre de dimensions a un effet relativement limité sur le nombre d'évaluations, comparé à des méthodes d'optimisation bayésiennes sur des problèmes similaires. Pour rester efficace un coût calculatoire, les intervalles de recherche pour chaque paramètre doivent tout de même être définis de manière pertinente. Idéalement, l'espace de recherche doit être suffisamment restreint pour contenir en majorité des solutions donnant lieu à des comportements valides, c'est-à-dire sans chute de l'humain et explosion du simulateur physique. Cependant, cet espace doit aussi être suffisamment large, afin de contenir les solutions optimales (et potentiellement très diverses) de toutes les morphologies étudiées.

VASSILIADES et al. (2018) introduisent le concept d'hypervolume d'élites. En biologie, deux espèces très différentes en apparence peuvent partager une part significative de leur génome, avec par exemple 60% de similitudes entre l'humain et la mouche du fruit. Dans le contexte de MAP-Elites, l'ensemble des solutions élites occupent en général un volume restreint dans l'espace de recherche, et ce, malgré des comportements potentiellement très différents d'une élite à l'autre.

Pour réduire l'espace de recherche initial et mieux cerner cet hypervolume d'élites, une approche possible consiste à effectuer une étude de sensibilité entre les paramètres sélectionnés et le comportement, pour les morphologies situées aux extrémités de l'espace des tâches. Le but est d'identifier pour chaque paramètre le plus grand intervalle de valeurs permettant de générer des comportements valides. Dans ces travaux, on part d'un paramétrage fixé manuellement pour la morphologie moyenne. Pour les morphologies extrêmes, la borne supérieure (respectivement inférieure) de chaque paramètre est augmentée (resp. diminuée) tant qu'un comportement valide est observé. Cette méthode est simple à réaliser et permet une vérification (qualitative) de l'influence d'un paramètre sur le comportement de l'humain virtuel.

**Fonction de coût** La fonction de coût doit guider l'optimisation vers des comportements permettant d'effectuer l'activité de la manière la plus ergonomique possible. Ici, la fonction de coût correspond à la fonction d'adéquation  $f_{suit}$  à minimiser. La fonction  $f_{suit}$  comprend trois niveaux hiérarchiques correspondant à trois cas de figure durant la simulation d'une

activité :

$$f_{suit} = \begin{cases} p_1 & \text{si interruption prématurée} & (5.2a) \\ f_{\text{perf}} + p_2 & \text{si } C_{\text{perf}} \text{ non vérifiée} & (5.2b) \\ f_{\text{ergo}} & \text{si } C_{\text{perf}} \text{ vérifiée} & (5.2c) \end{cases}$$

avec  $p_1$  et  $p_2$  des termes de pénalité,  $f_{\text{ergo}}$  le coût ergonomique et  $f_{\text{perf}}$  le coût de performance.

**Cas 1** (équation 5.2a) : l'humain virtuel ne termine pas l'activité. La simulation est interrompue lorsque l'humain perd l'équilibre ou bien s'il manque une étape qui l'empêche de poursuivre l'activité (par exemple, attraper/reposer un outil ou un objet). Dans ce cas, un terme de pénalité élevé  $p_1$  est appliqué.

**Cas 2** (équation 5.2b) : l'humain virtuel termine l'activité mais avec une performance insuffisante. Les conditions d'adéquation notées  $C_{\text{perf}}$  définissent les critères à remplir pour que l'activité soit considérée comme accomplie. Le coût de performance  $f_{\text{perf}}$  est une mesure de la qualité d'exécution de l'activité. Ainsi, lorsque l'activité n'est pas réalisée (c.-à-d. les conditions  $C_{\text{perf}}$  ne sont pas vérifiées), seule la performance  $f_{\text{perf}}$  est optimisée, avec une faible pénalité  $p_2$ . La définition de  $f_{\text{perf}}$  et  $C_{\text{perf}}$  dépend de l'activité simulée. Un cas d'usage avec une formulation spécifique à l'activité sera présenté par la suite (section 5.3).

**Cas 3** (équation 5.2c) : l'humain virtuel termine l'activité. Le coût ergonomique  $f_{\text{ergo}}$  est une mesure du risque ergonomique encouru par l'humain pendant toute la durée de l'activité. Ainsi, si l'humain parvient à réaliser l'activité, seul  $f_{\text{ergo}}$  est optimisé. Plus précisément,  $f_{\text{ergo}}$  correspond à un indicateur ergonomique approprié pour l'activité en question, voire possiblement une somme pondérée de plusieurs métriques liées à l'ergonomie. La sous-section 2.2.3 décrit plusieurs critères ergonomiques applicables.

On considère un coût ergonomique basé sur la minimisation de couples articulaires normalisés : le but est de générer des mouvements évitant des efforts articulaires excessifs pouvant être à l'origine de TMS si les mouvements sont répétés sur le long terme.

$$f_{\text{ergo}} = \frac{1}{T} \sum_{t=0}^T \frac{1}{N} \sum_{n=0}^N \max_i \left( \frac{|\tau^{n,i}(t)|}{\tau_{\text{max}}^{n,i}} \right) \quad (5.3)$$

où  $\tau_{\text{max}}^{n,i}$  est le couple articulaire maximal pour le DDL  $i$  de l'articulation  $n$ . Les couples normalisés sont moyennés sur les articulations de l'humain et sur les pas de temps, afin d'obtenir un score unique à optimiser. De plus, si une articulation présente plusieurs degrés de liberté (DDL), seul le couple maximal parmi les DDLs est pris en compte. Ainsi, le coût ergonomique est plus important lorsque l'humain est proche de ses capacités maximales en couples ce qui est plus propice à des blessures.

La formulation générale de  $f_{suit}$  (équation 5.2) exprime une hypothèse sur les priorités dans le comportement de l'humain. Ce dernier va d'abord chercher à réaliser l'activité, sans se soucier de l'ergonomie. Puis, parmi les comportements permettant d'effectuer l'activité, il va chercher le comportement le plus ergonomique. Pour établir une hiérarchie entre les trois cas de figure, la condition suivante est nécessaire :

$$p_1 \gg p_2 \gg f_{\text{perf}}, f_{\text{ergo}} \quad (5.4)$$

### 5.3 Cas d'usage : activité de vissage

L'approche proposée est appliquée pour une activité de vissage. Cet exemple d'application sert de preuve de concept et permet de comprendre comment notre approche s'intègre dans le processus d'amélioration d'un poste de travail.



### 5.3.1 Description de l'activité

**Déroulement de l'activité** Dans cette activité, l'humain virtuel doit atteindre deux cibles distinctes avec l'effecteur de l'outil (la pointe de vissage). Les cibles sont situées sur un panneau de vissage devant l'opérateur avec un convoyeur qui fait obstacle entre l'humain et le panneau (voir figure 5.2). Deux scénarios avec une distance de panneau différente sont simulés.

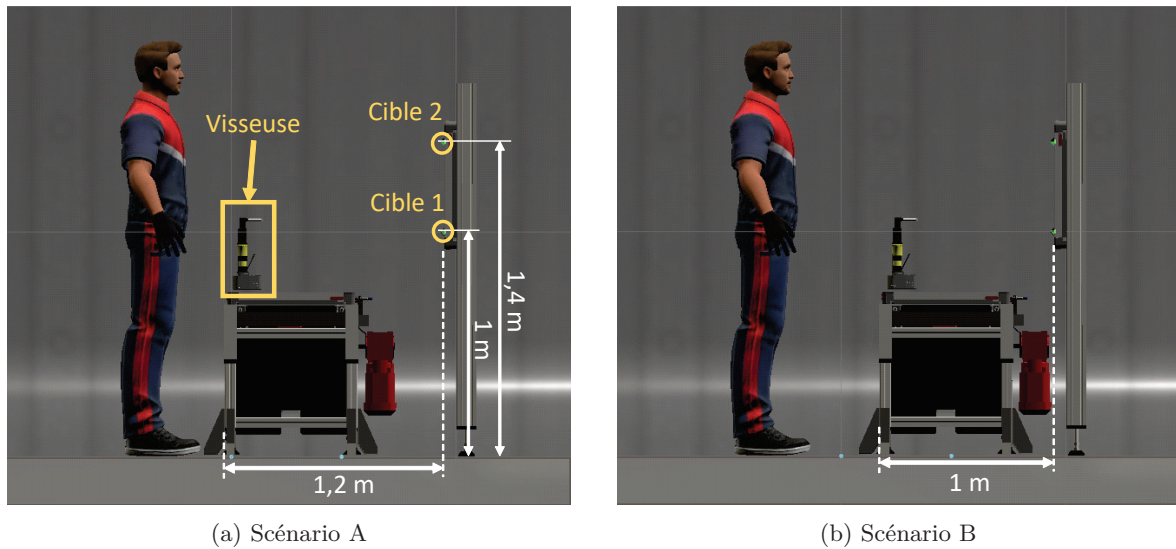


FIGURE 5.2 – Vue de côté du poste de travail virtuel, pour les deux scénarios considérés.

Pour effectuer l'activité de vissage, l'humain virtuel doit suivre les étapes suivantes :

1. **Prendre l'outil de vissage.** L'humain virtuel est configuré dans une posture initiale. Ce dernier déplace sa main droite pour aller attraper la visseuse située sur un support à hauteur du bassin. La visseuse portable pèse 2 kg.
2. **Atteindre le premier point de vissage,** situé à 1 m de hauteur et maintenir l'effecteur en position pendant 2 secondes.
3. **Atteindre le second point de vissage,** à 1,4 m de hauteur et maintenir l'effecteur en position pendant 2 secondes.

La séquence entière dure environ 10 secondes. La simulation termine prématurément dans les situations suivantes : l'humain virtuel chute, l'humain virtuel entre en collision avec le convoyeur ou bien l'humain virtuel n'arrive pas à saisir la visseuse.

Lors de la prise de l'outil, il n'y a pas de contrôleur pour gérer la manipulation. La structure cinématique des doigts n'est pas modélisée sur l'humain virtuel. À la place, lorsque l'outil est suffisamment proche de la main droite, l'outil est attaché rigidement sur la main droite dans la simulation physique. Dans le contrôleur QP, le modèle dynamique est mis à jour en ajoutant les propriétés inertielles du corps rigide de l'outil à celles du corps rigide de la main droite.

**Variantes d'activité** L'approche proposée permet d'itérer sur la conception d'un poste de travail pour qu'il soit mieux adapté à une large population de morphologies. Pour illustrer cela, on considère deux variantes de poste de travail où l'on joue sur la distance du panneau de vissage :

- Scénario A : le panneau de vissage est situé à 120 cm de l'humain (figure 5.2a).



— Scénario B : le panneau de vissage est situé à 100 cm de l'humain (figure 5.2b).

Nous faisons l'hypothèse que dans le scénario A, l'humain virtuel est trop éloigné du panneau, ce qui peut poser problème pour les petites morphologies avec une atteinte réduite. Dans le scénario B, le poste de travail est modifié pour rapprocher le panneau de 20 cm. Nous nous attendons alors à une amélioration en termes d'ergonomie et d'atteignabilité sur l'ensemble de la population.

### 5.3.2 Application de MTME au cas d'usage

Dans la section précédente, des recommandations génériques et applicables ont été présentées pour différents types d'activités manuelles. Ici, la formulation du problème avec MTME est présentée plus spécifiquement pour l'activité de vissage.

#### 5.3.2.1 Morphologies

L'espace de tâches (au sens de MTME) est paramétré par deux caractéristiques morphologiques : la taille et l'indice de masse corporelle (IMC). Pour chaque dimension, on prend 10 valeurs réparties uniformément, entre 1,5 m et 2 m pour la taille et entre 16 (sous-poids) et 34 (obésité) pour l'IMC. Pour l'ensemble  $\mathcal{M}$  des morphologies, on considère toutes les combinaisons de taille et d'IMC, soit une population de 100 morphologies différentes.

Le choix de l'IMC au lieu du poids permet une représentation plus simple sous forme de grille de l'adéquation en fonction de la morphologie. En effet, les combinaisons de taille et IMC considérées donnent des morphologies plausibles. Ce n'est pas le cas avec le poids : un poids de 50 kg est plausible pour une individu de 1,5 m, mais hautement improbable pour un individu de 1,95 m.

#### 5.3.2.2 Paramètres

L'espace de recherche pour MTME contient 10 paramètres qui configurent la posture initiale de l'humain virtuel et le contrôleur corps-complet.

- Le positionnement des pieds sur le plan horizontal, défini par 4 paramètres. Les paramètres  $(\delta x_{\text{foot}}, \delta y_{\text{foot}})$  définissent l'espacement relatif entre les pieds selon l'axe  $x$  (antéro-postérieur) et l'axe  $y$  (transverse). Les paramètres  $(x_{\text{foot}}, y_{\text{foot}})$  définissent les coordonnées du point de positionnement des pieds  $X_{\text{foot}}$  exprimé dans le repère de la simulation. Le point  $X_{\text{foot}}$  correspond plus précisément au milieu du segment reliant l'origine des repères de deux pieds. Ce paramétrage permet de définir plus facilement des intervalles de paramètre valides, comparé à un paramétrage direct de la position de chaque pied par leurs coordonnées  $(x, y)$  sur le sol.
- Les poids  $(w_{\text{p,torso}}, w_{\text{p,leg}})$  et les gains  $K_{\text{p}}$  pour les tâches posturales du torse et des jambes. Le réglage de ces paramètres permet aux parties du corps concernées de s'écarter plus ou moins de la posture de référence (N-pose) et d'atteindre des postures différentes selon le réglage relatif des poids posturaux.
- Le poids de la tâche de minimisation des couples  $w_{\tau_{\text{min}}}$ . En faisant varier ce poids, on peut s'attendre à générer des comportements plus ou moins ergonomiques sur l'humain virtuel, avec des couples plus ou moins proches des valeurs limites.
- Le gain de la tâche cartésienne  $K_{\text{c}}$  de la main droite. Le but est de favoriser plus ou moins le suivi strict de la trajectoire de référence, sachant qu'un compromis doit être fait entre l'ergonomie et la stabilité de l'humain virtuel. Un gain élevé permet un suivi

plus réactif de la référence, ce qui peut cependant perturber l'équilibre de l'humain et mener à des mouvements moins ergonomiques. Quant au poids de la tâche cartésienne, celui-ci n'est pas optimisé : on considère que  $w_{p,torso}$ ,  $w_{p,leg}$  et  $w_{\tau_{min}}$  sont exprimés relativement au poids de la tâche cartésienne.

- La position de référence du centre de masse (CdM)  $x_{com}^{ref}$  sur l'axe antéro-postérieur. Pour s'assurer que la référence de CdM reste à l'intérieur du polygone de support, la position  $x_{com}^{ref}$  est exprimée relativement aux limites du polygone de support sur l'axe antéro-postérieur. Le réglage de ce paramètre permet de jouer sur le compromis entre l'atteinte de la cible (en avançant le CdM) et la conservation de l'équilibre.

TABLE 5.1 – Paramètres considérés pour le contrôle corps-complet. Les paramètres optimisés avec MTME et les intervalles de recherche correspondants sont mis en évidence **en gras**.

Paramètres		Valeurs
<i>Tâches posturales</i>		
• <b>Gain</b>	$K_p$	<b>[250 ; 2500]</b>
• <b>Poids, jambes</b>	$w_{p,leg}$	<b>[1 ; 100]</b>
• <b>Poids, torse</b>	$w_{p,torso}$	<b>[1 ; 100]</b>
• Poids, cou		0,01
• Poids, bras gauche		1
• Poids, bras droit		0,001
<i>Tâches cartésiennes</i>		
• <b>Gain, effecteur</b>	$K_c$	<b>[1e3 ; 1e4]</b>
• Poids, effecteur		100
• Gain, tête		500
• Poids, tête		100
<i>Tâche de CdM</i>		
• Gain		200
• Poids		1e5
• <b>Référence (X)</b>	$x_{com}^{ref}$	<b>[-0,5 ; 0,8]</b>
<i>Tâche de minimisation des couples</i>		
• <b>Poids</b>	$w_{\tau_{min}}$	<b>[0,1 ; 10]</b>
<i>Positionnement des pieds</i>		
• <b>Espacement (X)</b> (en m)	$\delta x_{foot}$	<b>[-0,4 ; 0,4]</b>
• <b>Espacement (Y)</b> (en m)	$\delta y_{foot}$	<b>[0,1 ; 0,6]</b>
• <b>Position (X)</b> (en m)	$x_{foot}$	<b>[-0,4 ; 0,4]</b>
• <b>Position (Y)</b> (en m)	$y_{foot}$	<b>[0,1 ; 0,6]</b>

Ces paramètres ont été choisis manuellement, en se basant sur la compréhension à plus haut niveau du fonctionnement du contrôleur QP et en testant expérimentalement l'effet des paramètres. Pour les intervalles de recherche, les bornes minimales et maximales sont choisies de telle sorte que les morphologies situées aux extrémités de l'espace des morphologies produisent des comportements valides. Le tableau 5.1 précise l'ensemble du paramétrage utilisé pour le contrôle QP ainsi que les intervalles de recherche pour les paramètres optimisés par MTME.

### 5.3.2.3 Capacités en couples articulaires

Dans notre approche, on considère une large population d'individus différents. Chaque individu possède des caractéristiques morphologiques propres qui influencent son comportement. Les capacités musculaires peuvent être très différentes d'une morphologie à l'autre, en particulier selon la taille et l'IMC de l'individu. De manière générale, un petit individu d'IMC faible possède des capacités musculaires moindres qu'un grand individu d'IMC élevé. De plus, la variabilité des capacités musculaires n'est pas la même selon les groupes musculaires considérés : une augmentation de l'IMC entraîne en général un renforcement plus marqué des muscles du bas du corps. Ces limites en couple articulaire doivent donc être ajustées selon la morphologie, en particulier selon la taille et l'IMC de l'individu.

Dans la littérature, il n'existe pas de modèle qui exprime explicitement les limites en couples articulaires  $\tau_{\max}$  en fonction de la taille, de l'IMC ou bien d'autres caractéristiques morphologiques. Un tel modèle doit en outre se baser sur des données expérimentales difficiles à recueillir. Cette sous-section propose une méthode basée sur des études issues de la littérature pour estimer  $\tau_{\max}$  en fonction de la taille et de l'IMC.

En termes de notations, on note  $I$  l'IMC de l'humain virtuel et  $H$  sa taille. La limite en couple articulaire pour une morphologie  $m \in \mathcal{M}$  et pour une articulation  $i$  est notée  $\tau_{\max}^i(m)$  avec  $m = (H, I)$ . Enfin, le symbole  $\bar{\cdot}$  sera utilisé pour désigner les valeurs liées à la morphologie moyenne (p. ex.  $\bar{H}$  pour la taille moyenne ou  $\bar{I}$  pour l'IMC moyen).

**Expression des forces musculaires maximales  $F_{\max}^i$**  Afin de trouver l'expression de  $\tau_{\max}^i(H, I)$  pour un DDL  $i$ , on cherche d'abord l'expression de la force musculaire maximale  $F_{\max}^i(H, I)$ .

On commence par poser l'hypothèse suivante sur la relation entre les capacités musculaires et l'IMC :

#### Hypothèse 5.1

Pour un DDL  $i$ , la force musculaire maximale  $F_{\max}^i(H, I)$  varie de manière affine avec l'IMC :

$$F_{\max}^i(H, I) = \alpha^i(H) I + \beta^i(H) \quad (5.5)$$

Il reste à déterminer comment  $\alpha$  et  $\beta$  s'expriment en fonction de  $H$ .

Pour cela, la force musculaire peut être reliée à la masse d'un individu, avec les hypothèses suivantes :

#### Hypothèse 5.2

Sur le groupe musculaire associé au DDL  $i$ , la force musculaire ( $F_{\max}^i$ ) est proportionnelle à la masse musculaire ( $M_m^i$ ) (HARRIS, 1997)

$$F_{\max}^i(H, I) = k_1^i M_m^i(H, I) \quad (5.6)$$

avec  $k_1^i$  un coefficient indépendant de  $H$  et  $I$ .

**Hypothèse 5.3**

Pour un IMC donné, la proportion de masse musculaire  $M_m^i$  est constante par rapport au poids total de l'individu :

$$M_m^i(H, I) = k_2^i(I) M_{\text{tot}} \quad (5.7)$$

avec  $k_2^i$  la proportion de masse musculaire,  $M_{\text{tot}}$  la masse totale de l'individu.

En combinant les deux hypothèses (équation 5.6 et équation 5.7) et sachant la définition de l'IMC :

$$\begin{aligned} F_{\text{max}}^i(H, I) &= k_1^i k_2^i(I) M_{\text{tot}} \\ &= k_1^i k_2^i(I) I H^2 \end{aligned} \quad (5.8)$$

L'égalité suivante est ainsi obtenue à partir des équations (5.5) et (5.8) :

$$F_{\text{max}}^i(H, I) = \alpha^i(H) I + \beta^i(H) = k_1^i k_2^i(I) I \bar{H}^2 \quad (5.9)$$

Cette expression montre que les coefficients  $\alpha^i$  et  $\beta^i$  sont quadratiques par rapport à  $H$  :

$$\begin{aligned} \alpha^i(H) &= \hat{\alpha}^i H^2 \\ \beta^i(H) &= \hat{\beta}^i H^2 \end{aligned} \quad (5.10)$$

avec  $\hat{\alpha}^i$  et  $\hat{\beta}^i$  des coefficients fixes et indépendants de  $m = (H, I)$

Dans la littérature, des études comparatives ont mesuré la différence de force musculaire entre des populations obèses et non-obèses pour différents groupes musculaires (HULENS et al., 2001 ; LAFORTUNA et al., 2005 ; CAVUOTO et al., 2019). Ces études donnent des valeurs moyennes pour deux populations d'IMC différents et permettent ainsi de calculer les coefficients  $\alpha^i(\bar{H})$  et  $\beta^i(\bar{H})$  pour une taille moyenne  $\bar{H}$ . En reprenant l'expression précédente :

$$\begin{aligned} \hat{\alpha}^i &= \frac{\alpha^i(\bar{H})}{\bar{H}^2} \\ \hat{\beta}^i &= \frac{\beta^i(\bar{H})}{\bar{H}^2} \end{aligned} \quad (5.11)$$

Les paires de valeur  $(F_{\text{max}}^i, I)$  utilisées pour calculer les coefficients  $(\alpha^i(\bar{H}), \beta^i(\bar{H}))$  sont détaillées en annexes (voir section A.2 en annexe).

Finalement, en reprenant les équations précédentes,  $F_{\text{max}}^i(H, I)$  s'exprime de la manière suivante :

$$\begin{aligned} F_{\text{max}}^i(H, I) &= \alpha^i(H) I + \beta^i(H) \\ &= \hat{\alpha}^i H^2 I + \hat{\beta}^i H^2 \\ &= \frac{\alpha^i(\bar{H})}{\bar{H}^2} H^2 I + \frac{\beta^i(\bar{H})}{\bar{H}^2} H^2 \\ F_{\text{max}}^i(H, I) &= (\alpha^i(\bar{H}) I + \beta^i(\bar{H})) \frac{H^2}{\bar{H}^2} \end{aligned} \quad (5.12)$$

**Expression des couples articulaires maximaux  $\tau_{\text{max}}^i$  :**

Dans ce manuscrit, l'humain virtuel se base sur un modèle articulé. Pour exprimer les couples articulaires maximaux  $\tau_{\text{max}}(H, I)$  en fonction de  $F_{\text{max}}(H, I)$ , l'hypothèse suivante est faite :

**Hypothèse 5.4**

Pour chaque degré de liberté  $i$ , le couple articulaire maximal ( $\tau_{\max}^i(H, I)$ ) est proportionnel à la force musculaire maximale ( $F_{\max}^i(H, I)$ ) :

$$\tau_{\max}^i(H, I) = \gamma^i F_{\max}^i(H, I) \quad (5.13)$$

Dans la littérature, divers travaux en biomécanique ont mesuré les limites en couples articulaires  $\tau_{\max}$ , avec des valeurs moyennes  $\bar{\tau}_{\max}$  sur un échantillon de population. En supposant que  $\bar{\tau}_{\max}$  correspond aux limites en couples pour la morphologie moyenne ( $\bar{I}$ ,  $\bar{H}$ ), le coefficient  $\gamma^i$  s'exprime de la manière suivante :

$$\begin{aligned} \tau_{\max}^i(\bar{I}, \bar{H}) &= \gamma^i F_{\max}^i(\bar{I}, \bar{H}) \\ \Rightarrow \gamma^i &= \frac{\tau_{\max}^i(\bar{I}, \bar{H})}{F_{\max}^i(\bar{I}, \bar{H})} \\ \Rightarrow \gamma^i &= \frac{\bar{\tau}_{\max}^i}{\alpha^i(\bar{H}) \bar{I} + \beta^i(\bar{H})} \end{aligned} \quad (5.14)$$

Enfin, en réintroduisant le coefficient  $\gamma^i$  dans l'expression (5.13), la formule finale suivante est obtenue pour  $\tau_{\max}^i(H, I)$  :

$$\tau_{\max}^i(H, I) = \bar{\tau}_{\max}^i \frac{(\alpha^i(\bar{H}) I + \beta^i(\bar{H})) H^2}{(\alpha^i(\bar{H}) \bar{I} + \beta^i(\bar{H})) \bar{H}^2} \quad (5.15)$$

Cette méthode permet d'avoir un ajustement raisonnable des  $\tau_{\max}$  en fonction des caractéristiques morphologiques (taille et IMC) de l'individu, sans devoir passer par des prises de données expérimentales coûteuses et complexes.

**5.3.2.4 Coût d'adéquation**

L'activité est considérée comme accomplie lorsque les conditions de performance  $C_{\text{perf}}$  sont satisfaites (équation 5.2). Pour l'activité de vissage, la pointe de l'outil de vissage doit être suffisamment proche des cibles et alignée sur l'axe normal de vissage. Plus précisément, l'activité est correctement effectuée si la tête de visseuse se trouve en moyenne à moins de 5 cm de la cible avec une déviation angulaire moyenne inférieure à  $10^\circ$ , lors des phases de vissage. Les conditions  $C_{\text{perf}}$  imposent les contraintes suivantes sur la pose de l'outil de vissage :

$$C_{\text{perf}} = \begin{cases} \bar{\epsilon}_p \leq \bar{\epsilon}_p^* = 0,05 \text{ m} \\ \bar{\epsilon}_r \leq \bar{\epsilon}_r^* = 10^\circ \end{cases} \quad (5.16)$$

$\bar{\epsilon}_p$  et  $\bar{\epsilon}_r$  dénote respectivement les erreurs en position et en orientation entre l'effecteur et la cible, moyennées sur les pas de temps correspondant aux phases de vissage. L'erreur en orientation est définie par l'angle minimal entre l'axe de la visseuse et l'axe normal de la cible.

Quant au coût de performance  $f_{\text{perf}}$  utilisé pour calculer  $f_{\text{suit}}$  (voir équation 5.2b), on veut pénaliser lorsque les erreurs ( $\bar{\epsilon}_p$  et  $\bar{\epsilon}_r$ ) passent au dessus des seuils d'erreurs autorisés ( $\bar{\epsilon}_p^*$  et  $\bar{\epsilon}_r^*$ ). Les positions et les rotations ne s'expriment pas dans le même espace. Pour éviter de donner trop d'importance à l'un ou l'autre, les erreurs en position et orientation sont normalisées et additionnées avec un poids de 0,5 chacun. De plus, l'activité est effectuée

tant que les contraintes  $C_{\text{perf}}$  sont respectées : l'humain n'a pas besoin de converger vers une erreur nulle. Pour cette raison, seule la partie positive des erreurs normalisées est conservée. Le calcul de  $f_{\text{suit}}$  est le suivant :

$$f_{\text{perf}} = \frac{1}{2} \left( \max \left( 0, \left( \frac{\bar{\epsilon}_p - \bar{\epsilon}_p^*}{\bar{\epsilon}_p^*} \right) \right) + \max \left( 0, \left( \frac{\bar{\epsilon}_r - \bar{\epsilon}_r^*}{\bar{\epsilon}_r^*} \right) \right) \right) \quad (5.17)$$

Pour les pénalités, les valeurs utilisées sont  $p_1 = 2000$  et  $p_2 = 1000$

### 5.3.3 Expériences et setup de simulation

Cette partie présente les expériences effectuées en simulation pour le cas d'usage proposé. D'une part, le problème est optimisé avec MTME pour évaluer l'adéquation de chaque scénario à la population étudiée. D'autre part, le problème est optimisé avec d'autres méthodes de l'état de l'art, dans le but d'évaluer les performances de MTME.

**Simulations avec MTME** Pour chaque scénario (A et B), on veut évaluer l'adéquation du poste de travail pour la population, ce qui implique de trouver un comportement proche de l'optimalité pour chacune des morphologies. Avec MTME, il n'est cependant pas possible de déterminer a priori si une solution est proche de l'optimalité. Il s'agit alors d'effectuer un nombre suffisamment élevé de simulations, tout en prenant en compte les limites de budget computationnel. Pour cette expérience, on choisit de lancer MTME sur 50000 itérations pour chacun des deux scénarios.

De plus, les résultats peuvent varier d'une optimisation à l'autre. MTME présente une part importante de stochasticité à plusieurs niveaux : lors de l'initialisation de l'archive, lors de la génération de solutions filles et lors de la sélection d'une morphologie cible. L'optimisation est répétée 10 fois à l'identique pour prendre en compte la variabilité des résultats issus de MTME.

Pour l'analyse des résultats (section 5.4), l'étude se porte principalement sur la répétition médiane. On note  $\bar{f}_{\text{suit}}$  le coût d'adéquation moyen à travers la population. La répétition médiane correspondant à la répétition ayant obtenu la valeur médiane sur  $\bar{f}_{\text{suit}}$  parmi les répétitions et à l'issue de l'optimisation. Pour étudier les comportements, les solutions élites sont rejouées à l'identique à partir de l'archive finale (la simulation est déterministe) afin d'obtenir l'ensemble des données de trajectoires nécessaires aux analyses.

**Comparaison avec d'autres approches** Les performances de notre approche sont comparées avec d'autres méthodes possibles pour résoudre le problème d'optimisation (équation 5.1) et utilisant des algorithmes d'optimisation classiques dans la littérature. Les questions suivantes se posent quant à la méthode de résolution :

- pour le problème posé, MTME fait-il mieux que des approches *Single-Task* (c.-à-d. optimisation séparée de chaque morphologie) ?
- plus généralement, s'agit-il bien d'un problème multi-tâches ? Il existe peut-être une solution unique et optimale pour l'ensemble des morphologies, ce qui remettrait en cause le cadre d'optimisation multi-tâches.

**Dispositif matériel** Ces expériences nécessitent d'effectuer un nombre important de simulations : les différentes approches doivent être testées sur deux scénarios et avec 10 répétitions. Pour réaliser les simulations, un cluster de machines de calcul disposant d'un processeur à

32 cœurs (Intel Xeon E5-2620 v4) a été utilisé. L'ensemble du code de simulation est encapsulé dans une image Docker, afin de déployer rapidement les différentes répétitions sur les machines de calcul. Sur chaque machine, une répétition de 30000 évaluations dure environ 4 jours.

## 5.4 Adéquation à l'activité de vissage et analyse comportementale

Dans cette section, les résultats concernant l'adéquation du poste de travail sont présentés pour le cas d'usage portant sur une activité de vissage (section 5.3). Le coût d'adéquation  $f_{\text{suit}}$  optimisé avec MTME pour l'ensemble de la population peut être visualisé sur la forme d'une carte d'adéquation. Cette carte permet d'identifier rapidement si des sous-ensembles morphologiques ne parviennent pas à réaliser l'activité de manière ergonomique. Nous verrons ensuite comment les données de simulation peuvent être analysées pour identifier les comportements à risque et pour étudier l'influence de la morphologie sur la réalisation de l'activité et l'ergonomie.

### 5.4.1 Cartes d'adéquation

Dans cette partie, l'objectif est de déterminer si les deux variantes de poste de travail du cas d'usage sont adaptées à la population étudiée. Pour déterminer si un scénario est adapté à une population, le coût d'adéquation  $f_{\text{suit}}$  pour l'ensemble des individus doit être pris en compte. Soit  $\mathcal{M}_{p+}$ , l'ensemble des individus qui répondent aux conditions de performance  $C_{\text{perf}}$  (voir équation 5.2c). À l'opposé,  $\mathcal{M}_{p-}$  désigne l'ensemble des morphologies pour lesquelles  $C_{\text{perf}}$  ne sont pas satisfaits (équation 5.2a et équation 5.2b). Un scénario est considéré comme adéquat si toutes les morphologies parviennent à réaliser l'activité :

$$\mathcal{M}_{p+} = \mathcal{M} \quad (5.18)$$

Un avantage de MTME (et de MAP-Elites en général) est de pouvoir visualiser directement le paysage de la fonction de coût sur un espace de plus petite dimension, malgré un espace de recherche de dimension élevée. Dans ce cas d'application,  $f_{\text{suit}}$  est projeté sur l'espace des tâches qui comporte deux dimensions morphologiques : la taille et l'IMC. Par la suite, les cartes d'adéquation pour les deux scénarios sont étudiées.

#### 5.4.1.1 Scénario A

Dans la figure 5.3, la carte d'adéquation donne une visualisation du coût  $f_{\text{suit}}$  sur l'ensemble de la population étudiée. Afin de gagner en lisibilité, la carte ne montre que le coût de performance  $f_{\text{perf}}$  (donc sans le terme de pénalité) pour toutes les morphologies appartenant à  $\mathcal{M}_{p-}$  (en rouge). Sinon, la carte ne montre que le coût ergonomique  $f_{\text{ergo}}$  pour les morphologies dans  $\mathcal{M}_{p+}$  (en vert).

D'après cette carte, 22 morphologies sur les 100 appartiennent à  $\mathcal{M}_{p-}$ . Le coût d'adéquation  $f_{\text{suit}}$  du poste de travail est principalement influencé par la taille  $H$  de l'humain. Une délimitation est observée pour une hauteur de  $H = 1,6$  m : les morphologies plus petites appartiennent à  $\mathcal{M}_{p-}$  (en rouge) alors que les morphologies plus grandes sont dans  $\mathcal{M}_{p+}$  (en vert). On note  $f_{\text{perf}}^H$  le coût de performance moyenné sur les morphologies d'une taille  $H$  fixée. Au sein de  $\mathcal{M}_{p-}$ , la performance s'améliore (c.-à-d.  $f_{\text{perf}}$  diminue) lorsque la taille



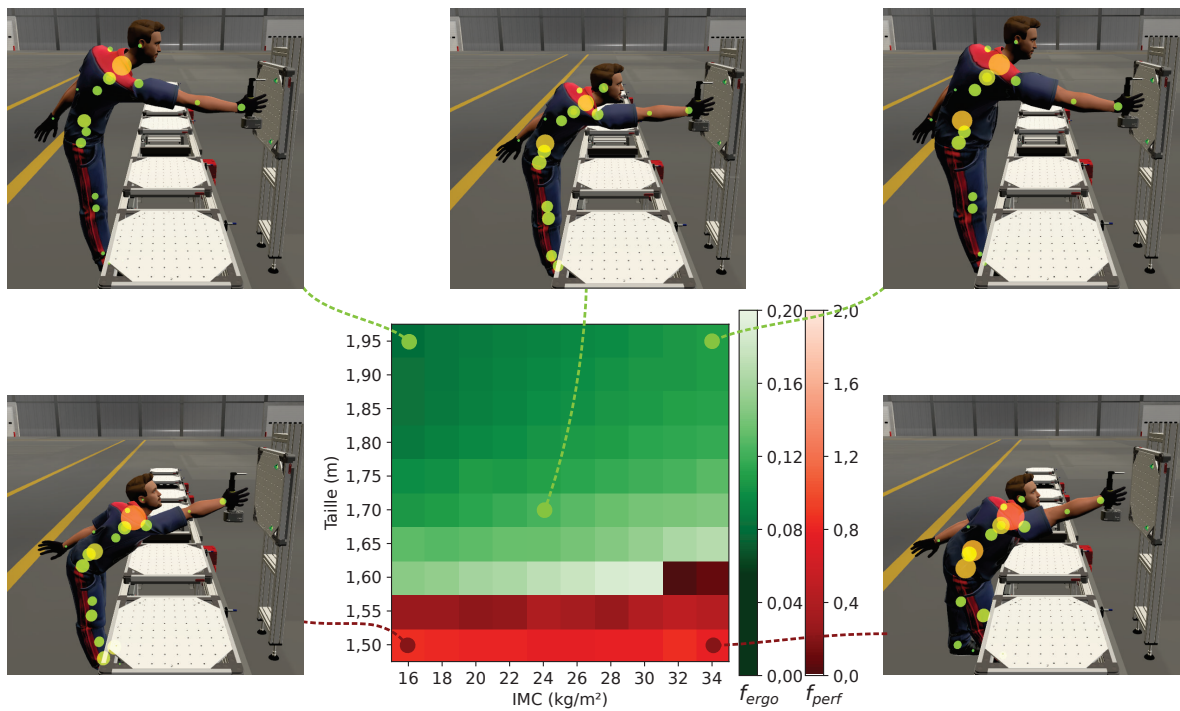


FIGURE 5.3 – Scénario A : carte d'adéquation et captures d'écran de postures pour plusieurs morphologies sur l'atteinte du second point de vissage. Chaque élément de la carte correspond à une morphologie dont la couleur dépend de la valeur de  $f_{\text{suit}}$ . Si l'activité n'est pas réalisée (c.-à-d. les conditions de performance  $C_{\text{perf}}$  ne sont pas satisfaites) alors seul le coût de performance  $f_{\text{perf}}$  est affiché en rouge. Sinon, seul le coût ergonomique  $f_{\text{ergo}}$  est affiché en vert. Sur les captures d'écran, les sphères de couleurs représentent les couples articulaires normalisés (couples faibles en vert, couples élevés en rouge).

augmente :  $f_{\text{perf}}^H$  passe de 0,805 (pour  $H = 1,5$  m) à 0,058 (pour  $H = 1,6$  m). De même dans  $\mathcal{M}_{p+}$ , l'ergonomie s'améliore (c.-à-d.  $f_{\text{ergo}}$  diminue) avec la taille :  $f_{\text{perf}}^H$  passe de 0,168 (pour  $H = 1,65$  m) à 0,095 (pour  $H = 1,95$  m). L'IMC a aussi un effet sur l'adéquation du poste de travail. En particulier pour  $H = 1,6$  m, les deux morphologies ayant l'IMC le plus élevé (IMC=32, IMC=34) ne parviennent pas à réaliser l'activité.

L'influence de la taille est attendue. Le scénario A demande à l'humain virtuel d'atteindre des cibles éloignées. Un humain de plus grande taille possède une meilleure portée de par sa structure cinématique, ce qui constitue un avantage décisif pour le scénario étudié. À l'inverse, il n'est physiquement pas possible pour un individu de très petite taille d'atteindre les cibles à cause de contraintes géométriques. Ainsi, la configuration du poste de travail doit être modifiée pour mieux accommoder ces petites morphologies. Plus précisément, les points de vissages devraient être plus proche de l'humain virtuel, afin que toutes les morphologies puissent atteindre les cibles de manière ergonomique. **Le scénario A n'est donc pas adapté à l'ensemble de la population étudiée.**

#### 5.4.1.2 Scénario B

Dans le scénario B, le panneau de vissage est rapproché de 20 cm par rapport à l'humain. Le but de cet ajustement est de corriger le défaut de conception identifié sur le scénario A et de permettre à toutes les morphologies – même les plus petites – de réaliser l'activité.

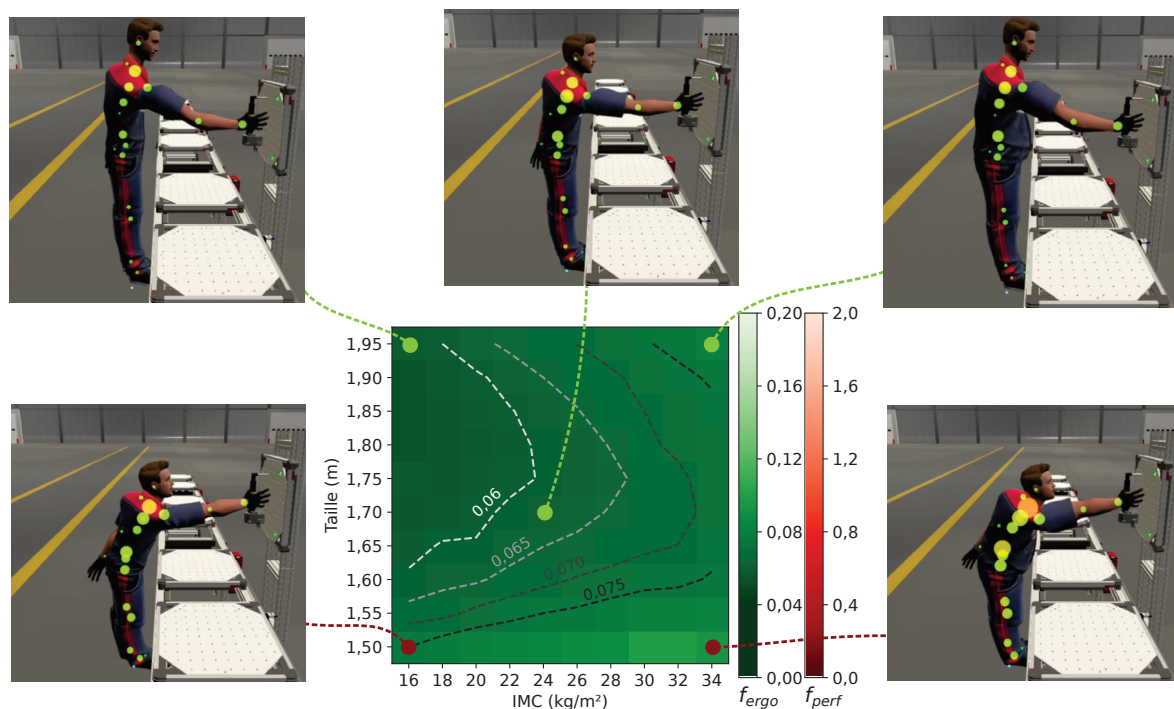


FIGURE 5.4 – Scénario B : carte d'adéquation et postures de quelques humains virtuels sur le deuxième point de vissage. Des lignes de niveaux sont dessinées pour mettre en valeur le gradient sur  $f_{\text{ergo}}$ , en allant du 20ème centile (ligne blanche) jusqu'au 80ème centile (ligne noire). La même échelle de couleur (figure 5.3) est utilisée afin de pouvoir comparer directement les cartes des scénarios A et B.

D'après la carte d'adéquation (figure 5.4), toutes les morphologies parviennent à réaliser l'activité (et appartiennent donc à  $\mathcal{M}_{p+}$ ), ce qui constitue une nette amélioration par rapport aux 22 morphologies dans  $\mathcal{M}_{p-}$  pour le scénario A. De plus, le coût ergonomique

$f_{\text{ergo}}$  moyenné sur  $M_{p+}$  est passé de  $0,117 \pm 0,026$  (Scenario A) à  $0,070 \pm 0,010$  (Scenario B), soit une réduction de 40% du coût  $f_{\text{ergo}}$ . Avec le scénario B, les comportements générés sont significativement plus ergonomiques sur l'ensemble de la population. Enfin, l'écart-type sur  $f_{\text{ergo}}$  dans  $M_{p+}$  a aussi diminué, passant de 0,026 (scénario A) à 0,01 (scénario B). La valeur de  $f_{\text{ergo}}$  est plus homogène au sein de la population : d'un point de vue ergonomique, le scénario B est moins discriminant que le scénario A pour la population étudiée.

Ces résultats semblent cohérents par rapport au changement de configuration opéré sur le scénario B. En rapprochant le panneau de vissage, les ouvriers peuvent plus facilement atteindre les cibles, sans avoir à se pencher excessivement vers l'avant. Ainsi, **le scénario B est réalisable pour l'ensemble de la population étudiée.**

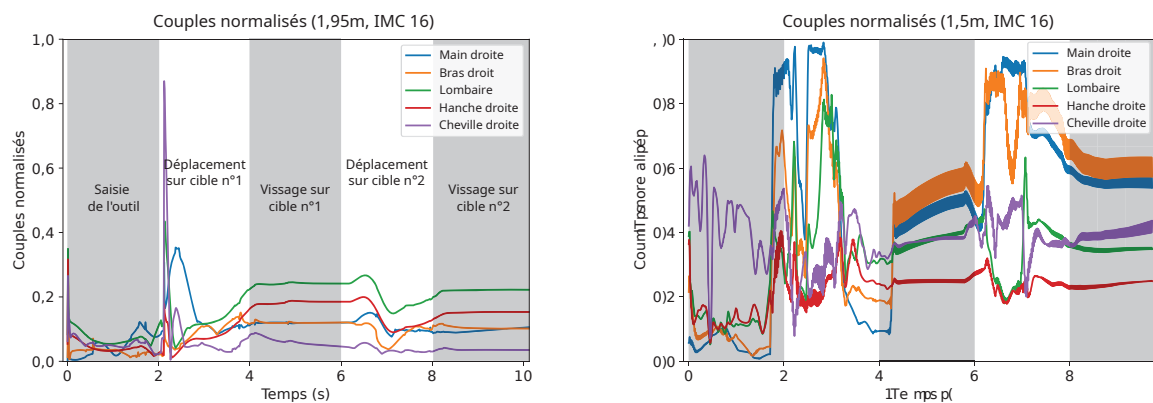
### 5.4.2 Comportements élités

Les cartes d'adéquation permettent de conclure que le scénario A n'est pas adapté pour l'ensemble de la population et plus spécifiquement pour les morphologies de petite taille. À l'inverse, pour le scénario B, l'ensemble de la population parvient à réaliser l'activité.

Dans cette section les comportements des humains virtuels optimisés avec MTME sont analysés sur divers aspects cinématiques et dynamiques. Le but est d'étudier l'influence de la morphologie (c.-à-d. de la taille et de l'IMC) sur le comportement de l'humain virtuel et sur le risque ergonomique, pour chaque scénario. Ces analyses visent à mieux comprendre les profils de cartes d'adéquation obtenus précédemment (voir [figure 5.3](#) et [figure 5.4](#)) et de vérifier si les comportements générés sont cohérents avec les observations expérimentales provenant de la littérature.

#### 5.4.2.1 Scénario A

Dans un premier temps, l'analyse des comportements se porte sur le scénario A. Le but est de comprendre plus précisément en quoi certaines morphologies sont moins adaptées (c.-à-d. les individus de petite taille et d'IMC élevé).



(a) Meilleure morphologie (H=1,95 m, IMC=16).

(b) Pire morphologie (H=1,5 m, IMC=16).

FIGURE 5.5 – Couples articulaires normalisés durant l'activité pour plusieurs articulations, pour les morphologies ayant obtenu le meilleur  $f_{\text{suit}}$  et le pire  $f_{\text{suit}}$ . Les différentes phases de l'activité sont délimitées par les bandes blanches et grises. Pour la pire morphologie, un filtrage (moyenne glissante sur 5 pas de temps) est appliqué : l'humain virtuel est souvent en limite d'équilibre, ce qui occasionne des oscillations importantes sur les couples articulaires.

**Phases de l'activité** La [figure 5.5a](#) donne les couples articulaires sur différentes parties du corps pour la meilleure morphologie (c.-à-d. morphologie avec le meilleur  $f_{\text{suit}}$ ). Les couples normalisés par rapport aux limites de couples permettent de visualiser sur un même graphe des couples provenant d'articulations différentes avec des échelles de valeur différentes. Sur les premiers pas de temps, les couples sont particulièrement élevés car l'humain virtuel vient d'être instancié et doit rapidement trouver son équilibre. Sur la phase de prise d'outil (entre 0 et 2 secondes), les couples sont faibles puis ils augmentent brusquement au moment où l'outil est attrapé. Lorsque l'humain attrape l'outil dans la simulation physique, le poids supplémentaire de l'outil (2 kg) doit être pris en compte au niveau du contrôleur corps-complet. À ce moment précis, les propriétés inertielles de l'outil sont ajoutées à celles de la main droite, ce qui implique une discontinuité au niveau du modèle dynamique. L'humain virtuel doit soudainement compenser le poids de l'outil, ce qui explique le pic de couples observé à 2 secondes. Ensuite, les deux phases de déplacement vers les cibles se succèdent, entre 4 et 6 secondes pour la première cible puis entre 8 et 10 secondes pour la seconde cible. Pendant ces phases, l'humain virtuel doit maintenir la posture de vissage pendant 2 secondes, d'où les valeurs relativement constantes pour les couples articulaires.

La [figure 5.5b](#) donne les trajectoires pour la « pire » morphologie ( $H=1,5$  m,  $IMC=34$ ) c.-à-d. celle avec le coût d'adéquation  $f_{\text{suit}}$  le plus élevé. Pour les articulations du haut du corps (main droite, épaule droite et lombaires), les couples mesurés s'approchent des limites en couples sur les phases de transitions, lorsque l'humain virtuel attrape l'outil et lorsqu'il change de cible. À l'inverse, pour la meilleure morphologie, les couples mesurés ne dépassent pas 30% des limites en couples pendant l'activité (sauf lors de la prise de l'outil). Les écarts sur les couples normalisés sont donc très importants entre les morphologies et plus particulièrement si l'on compare les extrêmes par rapport au coût d'adéquation  $f_{\text{suit}}$ .

Sur la même figure, des oscillations sur les couples sont observées et ce malgré le filtrage temporel sur la trajectoire. Ces oscillations sont visibles en particulier pendant les phases de déplacement vers les cibles. Pendant ces phases, les humains virtuels de petite taille doivent se pencher vers l'avant pour atteindre les cibles et se retrouvent dans des postures peu ergonomiques et proches de l'instabilité ([figure 5.3](#)). Ces variations importantes sur les couples articulaires ne sont pas réalistes (par rapport à l'humain réel qui anticipe ses mouvements). Une perspective pour des travaux futurs consisterait à modéliser la dynamique d'actionnement, en imposant une limite sur la variation des couples articulaires. Une méthode possible serait d'adapter la valeur des limites en couples à chaque pas de temps en fonction des couples courants. Cependant, l'humain virtuel pourrait ne plus réagir suffisamment vite lorsqu'il est proche d'une chute. Sans planification ou une gestion différente de l'équilibre, un nombre plus important de solutions résulterait en un échec de complétion d'activité.

**Influence de la taille** Dans la [figure 5.3](#), on peut voir plusieurs morphologies effectuant l'activité, au niveau du dernier point de vissage. Sur ce scénario, les humains virtuels de petite taille doivent adopter des postures moins ergonomiques pour atteindre les cibles : leur dos est fortement penché avec le bras levé et portant l'outil de vissage (soit 2 kg à bout de bras).

Sur la [figure 5.6a](#), l'angle de flexion du dos est défini dans le plan sagittal comme l'angle entre le segment reliant le bassin au cou et l'horizontal. L'angle du dos observé est effectivement plus élevé pour des humains de plus petite taille tout au long de l'activité. Pour un  $IMC$  de 24, l'angle de flexion maximal passe de  $35^\circ$  pour la plus grande morphologie ( $H=1,95$  m) à  $67^\circ$  pour la plus petite ( $H=1,5$  m).

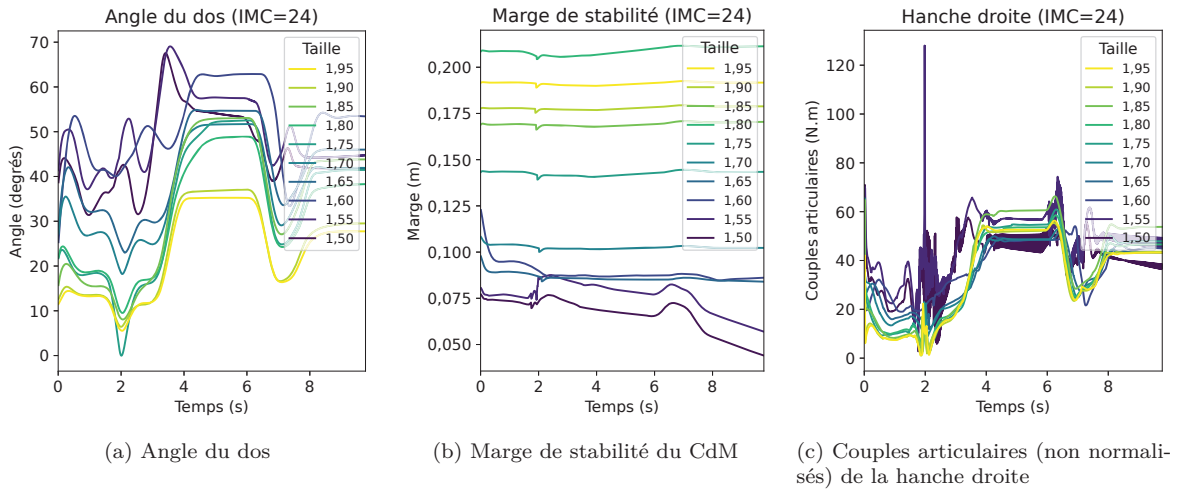


FIGURE 5.6 – Scénario A. Effet de la taille de l’humain virtuel sur différentes trajectoires, pour un IMC de 24 (IMC moyen).

De telles postures pourraient poser des problèmes pour l’équilibre de l’humain virtuel. Pour vérifier cela, la marge de stabilité sur le centre de masse est définie comme la distance entre le CdM et la limite du polygone de support dans la direction du panneau de vissage projeté sur le plan horizontal. Pour un IMC de 24, la marge de stabilité est positivement corrélée avec la taille (figure 5.6b) : plus l’humain est petit, plus la marge de stabilité est réduite. La marge reste relativement constante durant l’activité pour les morphologies dans  $M_{p+}$ . En revanche, pour les morphologies dans  $M_{p-}$  ( $H=1,5\text{ m}$  et  $H=1,55\text{ m}$ ), la marge de stabilité continue de diminuer durant l’activité. Le CdM se rapproche des limites du polygone de support sur une posture en quasi-statique, et donc d’une potentielle chute.

La figure 5.6c compare les couples articulaires sur la hanche droite en fonction de la taille, pour un IMC de 24. Les angles du dos plus élevés sont principalement liés à la flexion de la hanche. Les couples ne semblent pas augmenter de manière significative pour des morphologies plus petites, malgré l’angle de flexion du dos plus élevé. Cependant, au niveau des couples normalisés, les couples de la hanche et du dos augmentent significativement avec la diminution de la taille. Cette augmentation s’observe pour plusieurs autres articulations, plus précisément sur les jambes (genoux, chevilles, orteils), le bras droit (épaule, coude et main) et le cou. En effet, les humains de petite taille sont proches du déséquilibre et doivent forcer plus sur les jambes et notamment sur les pieds pour maintenir les points de contact entre les pieds et le sol. Sur les phases de l’activité où l’humain doit se pencher le plus, l’humain virtuel se retrouve parfois à décoller les talons pour se mettre sur la pointe de pieds. À cause de ces changements brusques de dynamique de contacts, l’humain virtuel se retrouve dans des postures particulièrement instables impliquant des pics de couples élevés pour rester en équilibre. Ce phénomène est propre à la simulation mais est symptomatique d’un problème d’équilibre sur l’humain réel.

La taille est donc un facteur morphologique particulièrement important sur la réalisation de l’activité de vissage étudiée. Plus la taille est petite, plus l’humain doit se pencher et lever le bras pour espérer atteindre les cibles. L’humain entre alors dans une configuration peu ergonomique et peu stable.



**Influence de l'IMC** Sur la carte d'adéquation (figure 5.3), il a été observé que le coût ergonomique  $f_{\text{ergo}}$  augmente (c.-à-d. l'ergonomie se dégrade) avec l'IMC pour les morphologies dans  $m_{p+}$  (c.-à-d. capables de réaliser de l'activité). Pour les individus de taille  $H=1,7\text{ m}$ ,  $f_{\text{ergo}}$  vaut 0,096 (c.-à-d. 9,6% des capacités en couples articulaires totaux) pour des individus d'IMC 16 (sous-poids). Puis  $f_{\text{ergo}}$  augmente continuellement jusqu'à 0,126 pour des individus d'IMC 34 (sur-poids). Comment expliquer cette augmentation de  $f_{\text{ergo}}$  avec l'IMC ?

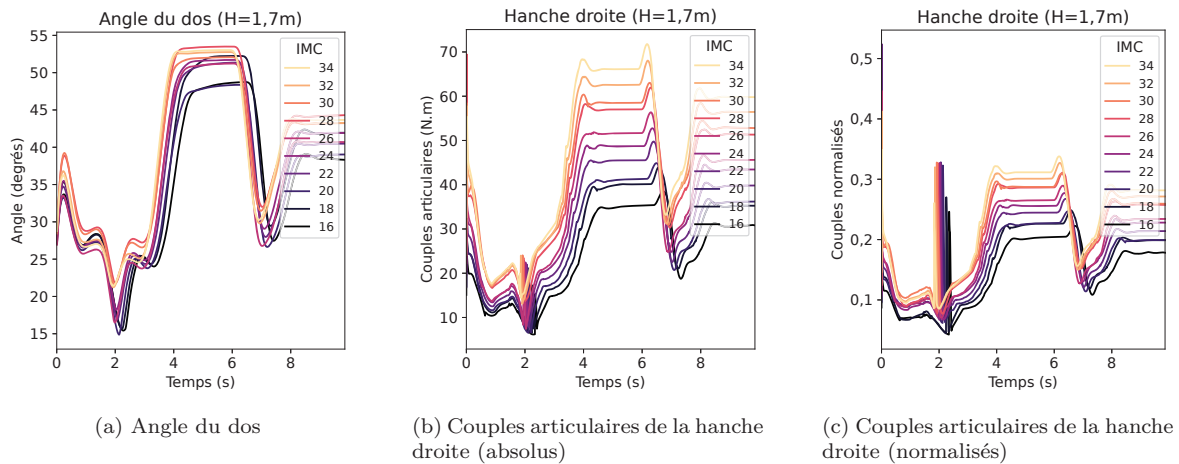


FIGURE 5.7 – Scénario A. Effet de l'IMC sur différentes trajectoires, pour une taille de 1,7 m (taille moyenne).

La figure 5.7a montre l'angle de flexion du dos en fonction de l'IMC pour une taille moyenne ( $H=1,7\text{ m}$ ). Sur les phases d'atteinte, les angles du dos observés sont élevés ( $51,9^\circ$  sur la cible 1 et  $41,9^\circ$  sur la cible 2, en moyenne sur les morphologies). L'inclinaison du dos semble augmenter avec l'IMC, mais avec une petite amplitude : les écarts entre l'angle minimal et maximal sont de  $5,3^\circ$  (cible 1) et  $5,9^\circ$  (cible 2). En comparaison selon la taille (figure 5.6a), les écarts d'angle sont significativement plus élevés avec des valeurs de  $27,5^\circ$  (cible 1) et  $25,7^\circ$  (cible 2). Ainsi, les individus de taille identique adoptent des postures relativement proches.

En revanche, sur les couples de la hanche droite (figure 5.7b), les couples articulaires augmentent significativement avec l'IMC pendant les phases d'atteinte, c'est-à-dire à partir de 3 secondes d'activité. Le pic de couple observé passe de  $38,5\text{ N.m}$  (IMC=18) à  $71,8\text{ N.m}$  (IMC=34), soit une augmentation relative de 86% sur les efforts produits au niveau de la hanche droite. En effet, un individu d'IMC plus élevé doit compenser au niveau de la hanche un bras de levier plus important lié à la masse supplémentaire du haut du corps, surtout sur des postures où l'humain doit pencher le dos pour atteindre des cibles éloignées.

Cependant, il faut aussi prendre en compte les capacités en couples des morphologies. En effet, un individu d'IMC plus élevé possède en moyenne des capacités en couples plus importantes. C'est surtout le cas pour les articulations du bas du corps et du dos, à cause d'un phénomène d'accommodation du poids de corps lié à l'exécution des tâches quotidiennes. La figure 5.7c donne les couples normalisés sur l'articulation de la hanche droite. Malgré la normalisation, les couples augmentent toujours avec l'IMC, mais avec une amplitude moindre. Pendant les phases d'atteinte, le pic de couple passe de 0,223 à 0,338, soit une augmentation relative de 51,5%. Cette observation est cohérente avec le fait qu'en moyenne, des individus obèses produisent une force relative à la masse totale plus petite en comparaison avec des individus d'IMC normal (LAFORTUNA et al., 2005). Ce phénomène contribue probablement à la prévalence élevée des TMS observées chez les populations obèses pour des activités manuelles sur poste de travail (BUCKLE et al., 2011).

**Influence sur les couples articulaires** La figure 5.8 montre les couples normalisés moyennés dans le temps et selon les dimensions morphologiques étudiées (taille et IMC). Sur la figure,  $C_{\Delta f_{\text{ergo}}}$  correspond au taux de contribution au coût ergonomique pour chaque articulation  $j$ . Cette grandeur est calculée de la manière suivante :

$$C_{\Delta f_{\text{ergo}}}^j = \frac{\tau_n^j(m_-) - \tau_n^j(m_+)}{f_{\text{ergo}}(m_-) - f_{\text{ergo}}(m_+)} \quad (5.19)$$

où  $m_+$  (resp.  $m_-$ ) est la morphologie avec le coût ergonomique  $f_{\text{ergo}}$  le plus faible (resp. le plus élevé), et  $\tau_n^j$  le couple normalisé moyen durant l'activité pour l'articulation  $j$ . Ainsi, ce taux de contribution correspond à l'écart en termes de couples normalisés entre la pire et la meilleure morphologie, normalisé par la différence sur  $f_{\text{ergo}}$  entre ces deux morphologies. Cette métrique permet de mesurer la contribution de chaque articulation  $j$  dans l'augmentation du coût ergonomique  $f_{\text{ergo}}$ .

La figure 5.8a donne l'évolution des couples normalisés  $\tau_n$  en fonction de la taille lorsque l'IMC est fixé à 24. Les dix articulations ayant contribué le plus à l'augmentation de  $f_{\text{ergo}}$  sont affichées. Comme attendu, lorsque la taille diminue, les articulations avec le  $C_{\Delta f_{\text{ergo}}}$  le plus élevé (et donc contribuant le plus à l'augmentation des couples  $\tau_n$ ) incluent les articulations du bas du corps (*Cheville, Orteil, Genou, Hanche*), du dos (*Lombaire*) et du bras droit (*Main droite, Bras droit, Avant-bras droit*). Comme observé avant, les petites morphologies doivent adopter une posture moins ergonomique pour espérer atteindre les cibles, en étant le plus penchées possible sans chuter. Cette posture est particulièrement contraignante pour toute la chaîne cinématique partant des jambes jusqu'au bras droit tenant l'outil, à cause du bras de levier de la gravité sur les membres en sur-extension. De plus, les deux plus petites morphologies ( $H=1,5$  m et  $H=1,55$  m) ne complètent pas l'activité. Elles optimisent le coût  $f_{\text{perf}}$  et non  $f_{\text{ergo}}$ , d'où les valeurs de couples particulièrement élevées pour ces morphologies.

La figure 5.8b donne l'évolution des couples normalisés en fonction de la taille en fonction de l'IMC pour une taille fixée à 1,7 m. Les articulations les plus sollicitées avec l'augmentation de l'IMC sont les articulations du dos et de la hanche, mais aussi des jambes. Cela rejoint les observations précédentes (figure 5.7) : les individus obèses possèdent en moyenne des capacités musculaires plus importantes dans l'absolu, mais plus faibles relativement à la masse.

Pour conclure sur le scénario A, la taille et l'IMC ont tout deux une influence significative sur le comportement optimisé de l'humain. La taille est le facteur le plus important : les petites morphologies doivent se pencher plus ce qui implique des couples articulaires plus important et un équilibre plus précaire. L'effet de l'IMC est moins visible sur les postures mais s'observe sur les couples articulaires : pour des morphologies d'IMC élevé, la masse supplémentaire provoque un bras de levier plus important au niveau des articulations en particulier pour des postures en limite d'équilibre.

#### 5.4.2.2 Scénario B

**Influence de la taille** D'après la carte d'adéquation (figure 5.4), le coût ergonomique  $f_{\text{ergo}}$  est meilleur pour des morphologies de taille intermédiaire, soit entre 1,75 m et 1,85 m selon la valeur de l'IMC. Pour un IMC moyen, le coût ergonomique est minimal pour  $H=1,75$  m ( $f_{\text{ergo}} = 0,062$ ) et se dégrade progressivement lorsque la taille diminue ( $f_{\text{ergo}} = 0,087$  pour  $H=1,5$  m) ou augmente ( $f_{\text{ergo}} = 0,069$  pour  $H=1,95$  m). Pour expliquer ce phénomène, on peut faire l'hypothèse que les hauteurs des cibles sont en cause. Les petites morphologies auraient



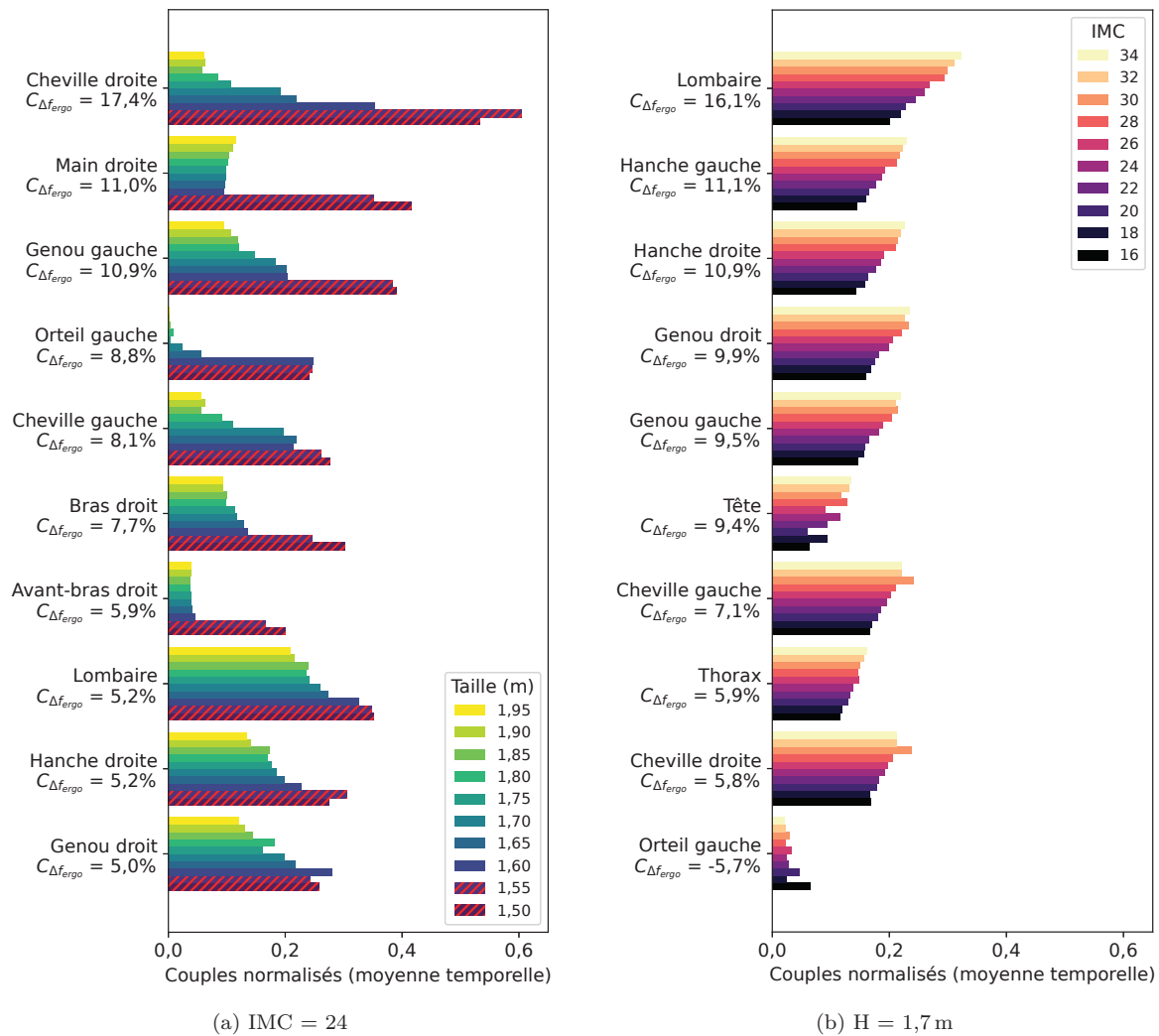


FIGURE 5.8 – Couples articulaires normalisés et moyennés sur le temps, pour différentes morphologies et articulations (scénario A). Pour chaque cas, les articulations représentées correspondent à celles contribuant le plus à l'augmentation du coût ergonomique ( $C_{\Delta f_{ergo}}$ ). Cette augmentation est mesurée entre la meilleure et la pire morphologie en termes de  $f_{ergo}$ . De plus, les morphologies n'ayant pas réussies à réaliser l'activité sont mises en avant (hachures rouges).

plus de facilité pour la première cible (à 1 m de hauteur) alors que les grandes morphologies seraient avantagées sur la seconde cible (à 1,4 m de hauteur). Pour ce scénario précis, l'activité serait plus facile pour une morphologie de taille intermédiaire.

La figure 5.9a montre l'erreur  $\varepsilon_{\text{eff}}$  sur le suivi en position de la trajectoire de référence pour la tâche cartésienne de l'effecteur. Sur la phase d'activité correspondant à la cible basse (1 m), l'erreur  $\varepsilon_{\text{eff}}$  est plus importante pour les grands individus. À l'inverse,  $\varepsilon_{\text{eff}}$  devient plus élevé pour les petits individus sur la cible haute (1,4 m). La taille a donc bien un effet sur la performance qui est différent selon la phase de l'activité et qui dépend de la hauteur de la cible à atteindre.

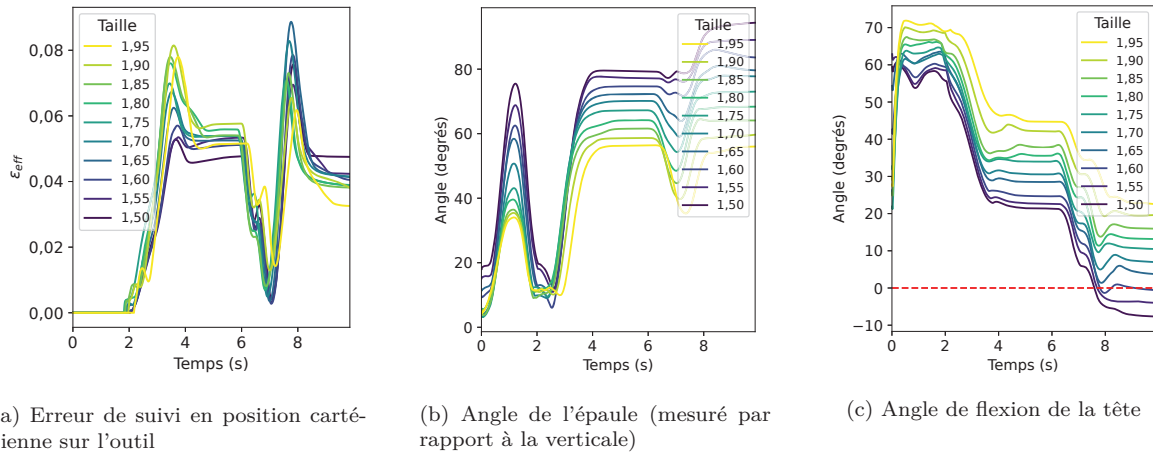


FIGURE 5.9 – Scénario B. Influence de la taille sur différentes trajectoires pour un IMC de 24 (répétition médiane).

Cet effet s'observe aussi sur les couples normalisés. La figure 5.10a montre les couples normalisés en fonction de la taille et pour les articulations les plus importantes. Les articulations contribuant le plus à la variation du coût ergonomique  $f_{\text{ergo}}$  se trouvent au niveau du bas du corps, du cou mais aussi sur l'épaule droite (*Clavicule droite*) et sur le dos (*Lombaire*). Contrairement au scénario A, pour de nombreuses articulations, le couple est minimal pour la morphologie intermédiaire et non pour la plus grande morphologie.

Pour les couples sur les jambes et le dos, comme dans le scénario A (figure 5.8a), les plus petits doivent pencher plus le dos vers l'avant. Le haut du corps génère alors un bras de levier important lié à la gravité, qui doit être compensé par le dos et le bas du corps.

Pour les articulations du cou, les couples normalisées diminuent avec la taille (*Cou*, *Tête*) et augmente de nouveau pour le *Cou* pour les petits (figure 5.10a). Pour comprendre ce phénomène, la figure 5.9c montre les trajectoires de l'angle de la tête au cours de l'activité, pour les morphologies d'IMC 24. Cet angle représente l'angle de flexion de la tête par rapport au plan horizontal<sup>4</sup>. Durant l'activité, les grands individus penchent plus leur tête vers l'avant. Pour ces individus, les deux cibles sont situées bien en dessous de la hauteur des yeux. Pour suivre la trajectoire de l'outil du regard, il est alors nécessaire d'incliner la tête vers l'avant en évitant par ailleurs d'incliner le dos. Pour les petites morphologies ( $H < 1,6$  m), l'angle de la tête devient inférieur à  $0^\circ$  sur la deuxième cible (entre 8 s et 10 s d'activité). À ce moment, ces individus doivent lever la tête pour suivre l'outil d'où l'augmentation des couples observée sur l'articulation *Cou*.

4. Plus précisément, à la composante Y de la décomposition en angles d'Euler ZYX sur la rotation de la tête

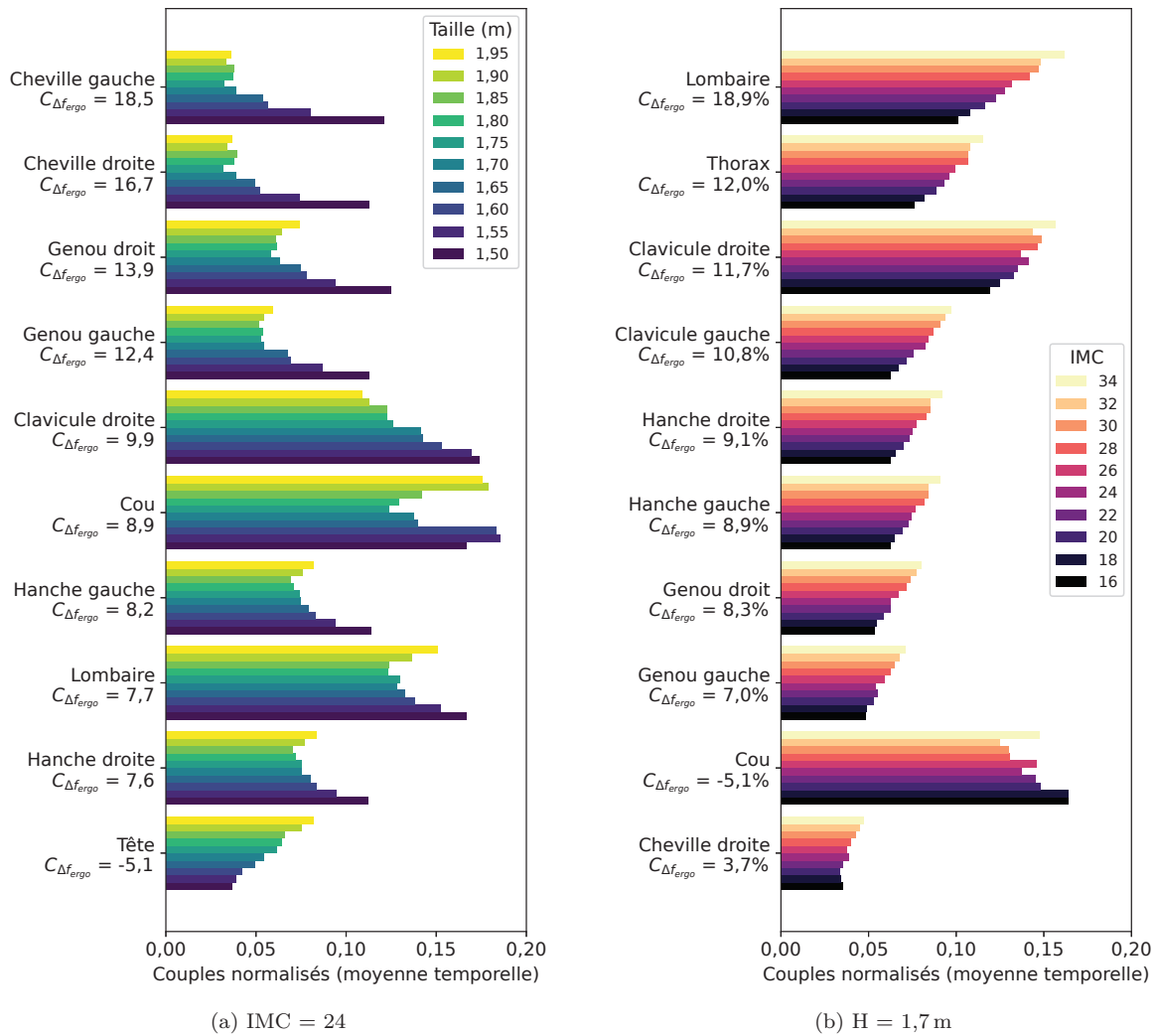


FIGURE 5.10 – Scénario B. Couples articulaires normalisés et moyennés sur le temps, pour différentes morphologies et articulations. Les 10 articulations représentées correspondent à celles contribuant le plus à l'augmentation du coût ergonomique ( $C_{\Delta f_{ergo}}$ ). Cette augmentation est mesurée entre la meilleure et la pire morphologie en termes de  $f_{ergo}$ .

Pour l'épaule droite, les couples sur la clavicule augmente lorsque la taille diminue. La [figure 5.9b](#) montre l'angle de l'épaule droite par rapport à la verticale. Un angle de zéro est idéal et correspond à la posture neutre pour le bras. Les individus de petite taille doivent lever significativement plus l'épaule pour suivre la trajectoire cartésienne de référence. Sur le premier point de vissage, le pic d'angle passe de  $56,2^\circ$  pour un grand ( $H=1,95$  m) à  $79,4^\circ$  pour un petit ( $H=1,5$  m). L'écart s'accroît sur le deuxième point de vissage : le pic d'angle baisse à  $55,4^\circ$  pour  $H=1,95$  m mais augmente à  $93,8^\circ$  pour  $H=1,5$  m. Les angles d'épaule sont souvent proches de  $90^\circ$  pour les petites morphologies, ce qui correspond au niveau de risque maximal pour l'épaule dans la méthode RULA (MCATAMNEY et al., 1993). Cela qui explique donc les couples articulaires supplémentaires observés.

Lorsqu'on regarde l'influence de la taille sur le coût d'adéquation, la hauteur de la cible a une influence sur le coût ergonomique  $f_{\text{ergo}}$ . Sur le scénario étudié, les deux hauteurs de cibles (resp. haute et basse) avantagent des individus de taille différente (resp. grandes et petites). Sur l'ensemble de l'activité, le coût ergonomique  $f_{\text{ergo}}$  est plus faible pour des morphologies de taille intermédiaire (entre 1,7 m et 1,85 m). Ces morphologies constituent le meilleur compromis en taille. Elles peuvent réaliser l'activité avec un angle raisonnable sur le dos et sur l'épaule, sans devoir à incliner trop la tête vers l'avant. Ainsi pour chaque morphologie et à cette distance de vissage, il existe une hauteur de vissage idéale qu'il faut pouvoir identifier et prendre en compte lors de la conception de postes de travail.

**Influence de l'IMC** Qualitativement ([figure 5.4](#)), les morphologies de même taille et d'IMC différents ont des mouvements et des postures de vissage visuellement similaires. Pour vérifier cela, on regarde les angles caractéristiques pour plusieurs segments de l'humain virtuel ([figure 5.11](#)). Pour la flexion de l'épaule droite ([figure 5.11a](#)), les trajectoires durant l'activité sont similaires quelque soit l'IMC. En revanche, l'angle de flexion du dos augmente avec l'IMC ([figure 5.11b](#)), de même que la marge de stabilité sur le CdM ([figure 5.11c](#)). Les amplitudes de variations sont relativement faibles, en comparaison avec les amplitudes observées précédemment pour des morphologies de tailles différentes ([figure 5.6](#), [figure 5.9](#))

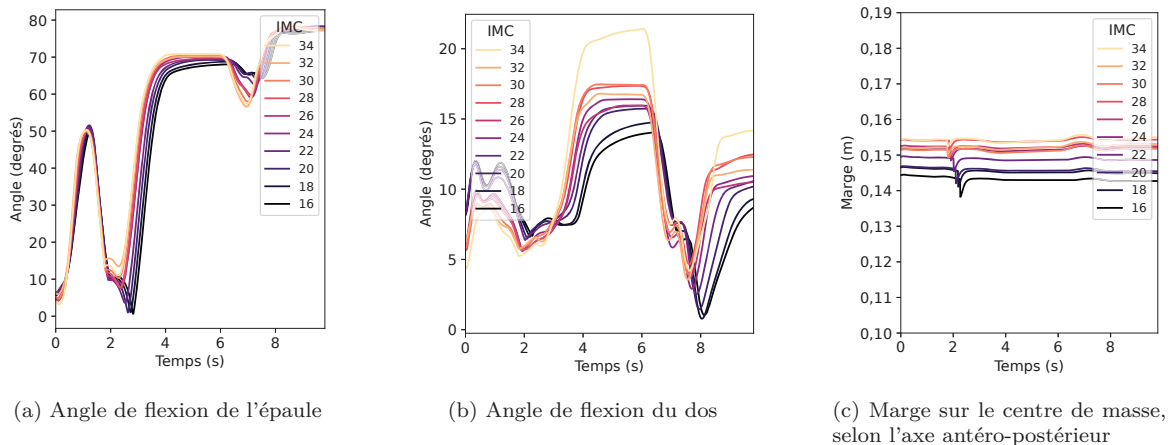


FIGURE 5.11 – Scénario B. Influence de l'IMC sur différentes trajectoires pour une taille de 1,7 m (répétition médiane).

La [figure 5.10b](#) donne les couples articulaires normalisés (moyenne sur l'activité) en fonction de l'IMC et pour une taille de  $H=1,7$  m. Parmi les dix articulations avec le plus d'effet sur le coût ergonomique  $f_{\text{ergo}}$ , on retrouve les articulations du dos (contribution de +30,9% sur les lombaires et le thorax), de la hanche (contribution de +18%) et des genoux (contribution

de +15,3%). Ces articulations doivent fournir des efforts plus importants liés à l'angle de flexion du dos plus élevé et à la masse supplémentaire lié à l'IMC. Pour les bras, le poids de corps supplémentaire lié à l'IMC est surtout compensé au niveau des clavicules (contribution de +22,5%).

Ainsi, l'IMC a un effet similaire à celui observé dans le scénario A. Par rapport aux individus d'IMC faible, les individus d'IMC élevé doivent fournir plus d'effort au niveau du dos et des jambes pour maintenir une posture similaire, à cause de la masse corporelle supplémentaire dans le haut du corps. Sur le scénario B, les pics de valeurs et les amplitudes de variation entre les morphologies sont cependant plus faibles pour toutes les mesures (angle du dos, couples normalisés et marges de stabilité).

Pour conclure sur le scénario B, on observe des postures plus confortables pour l'ensemble des morphologies avec des couples articulaires plus faibles et un équilibre plus stable. L'effet de la taille est légèrement différent par rapport au scénario A, avec un coût ergonomique plus faible pour une taille intermédiaire lié au positionnement des cibles. L'effet de l'IMC est quant à lui similaire au scénario A, avec des couples normalisés plus élevés lorsque l'IMC augmente.

### 5.4.2.3 Comparaison entre scénario A et B

Précédemment, les scénarios A et B ont été analysés en termes de posture, de couples ou d'équilibre. Ici, l'objectif est de mettre en commun les analyses et de faire une comparaison directe entre les deux scénarios sur les principales métriques présentées. Il s'agit aussi de voir si les résultats sont cohérents à travers l'ensemble des répétitions (10 par scénarios).

**Flexion du dos (IMC=24)** La [figure 5.12](#) montre l'effet de la taille sur les angles de flexion du dos (moyennés sur le temps) pour l'ensemble des répétitions sur les scénarios A et B. Les morphologies qui n'arrivent pas à réaliser l'activité sont représentées séparément, ce qui est le cas pour le scénario A pour les petites morphologies.

Pour le scénario A, l'angle de flexion évolue différemment selon si la morphologie est dans  $M_{p+}$  (succès) ou  $M_{p-}$  (échec). Dans  $M_{p-}$ , l'angle de flexion médian augmente avec la taille et atteint un maximum ( $56^\circ$ ) lorsqu'il est au plus proche d'accomplir l'activité à  $H=1,6$  m. En effet, ces angles de flexion élevés viennent du fait que pour les morphologies concernées, il s'agit encore d'optimiser le coût de performance  $f_{\text{perf}}$  et non le coût ergonomique  $f_{\text{ergo}}$ . Dans cette phase d'optimisation, les solutions permettant de se rapprocher des cibles sont privilégiées, sans considération pour le coût ergonomique. Dans  $M_{p+}$ , la valeur médiane sur l'angle du dos diminue avec la taille, avec une réduction nette entre  $H=1,6$  m ( $48^\circ$ ) et  $H=1,75$  ( $33^\circ$ ). Comme analysé dans la section précédente ([figure 5.6a](#)), les petites morphologies doivent se pencher sensiblement plus pour réaliser l'activité de manière ergonomique.

L'effet de la taille est différent sur le scénario B. Lorsque la taille augmente, l'angle du dos médian diminue initialement (de  $18,3^\circ$  ( $H=1,5$  m) à  $10,3^\circ$  ( $H=1,7$  m)) mais augmente de nouveau après  $H=1,85$  m (jusqu'à  $11,8^\circ$  à  $H=1,95$  m). Un individu de taille intermédiaire a en moyenne moins besoin de baisser le dos pour atteindre les deux cibles. Les petits doivent se pencher plus à cause de leur portée limitée, idem pour les grands sur la cible basse. Ces observations rejoignent l'analyse faite sur le scénario B ([figure 5.9a](#)).

Les écarts d'angle de flexion sont significatifs entre les scénarios A et B, quelque soit la taille. Ainsi, l'ajustement de la profondeur de cible a eu un effet particulièrement significatif sur l'amélioration de la posture du dos. Cet effet est bien plus significatif que celui de la morphologie. Ceci montre bien l'importance d'avoir un poste de travail dont les dimensions sont correctement ajustées aux morphologies devant travailler dessus.

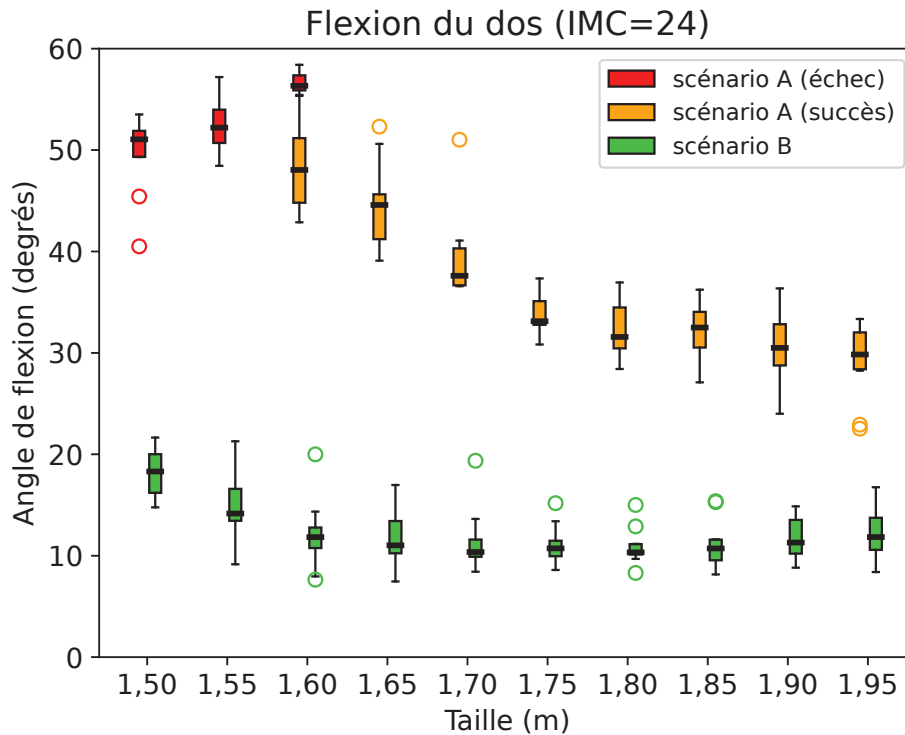


FIGURE 5.12 – Angle de flexion du dos (moyenne sur l'activité) en fonction de l'IMC et pour une taille de  $H=1,7\text{m}$ . Le graphe montre les distributions sur l'ensemble des répétitions pour les deux scénarios (A et B) et pour les solutions élites.

**Couples articulaires ( $H=1,7\text{m}$ )** La figure 5.13 montre l'effet de l'IMC sur les couples normalisés des lombaires, sur les deux scénarios et l'ensemble des répétitions. Pour les deux scénarios, les couples moyennés dans le temps augmentent linéairement avec l'IMC.

En valeur absolue, le gain en couple est plus important sur le scénario A (+12,3 points) comparé au scénario B (+5,7 points). Cependant, le gain en couple relatif lié à l'IMC est similaire pour les deux scénarios (+59,5% pour le scénario A contre +56,0% pour le scénario B). Cela rejoint les observations précédentes (figure 5.8b et figure 5.10b) sur les couples articulation normalisés et plus particulièrement sur les couples du dos. Durant l'activité, les individus sont amenés à atteindre des cibles excentrées par rapport aux points d'appui (entre les pieds et le sol), ce qui induit des postures provoquant un bras de levier plus important lorsqu'il y a de la masse supplémentaire liée à l'IMC.

Un autre élément intéressant à observer est la variabilité plus faible sur des couples sur le scénario A, avec un écart-type moyen de  $\sigma_A = 0,0086$  (scénario A) contre  $\sigma_B = 0,0183$  (scénario B). L'explication la plus probable est que le scénario A est plus difficile à réaliser et donc plus contraignant sur les comportements possibles. Sur le scénario A, l'espace des comportements possibles serait donc plus réduit, et la variabilité des comportements issue de l'optimisation est réduite aussi. À l'inverse pour le scénario B, il existerait plus de manières possibles de réaliser l'activité qui soient quasiment équivalentes d'un point de vue ergonomique (du moins, en termes de  $f_{\text{ergo}}$ ). Par exemple, l'humain virtuel pourrait pencher plus le dos pour diminuer la hauteur de la tête et ainsi réduire l'inclinaison de la tête (et inversement).

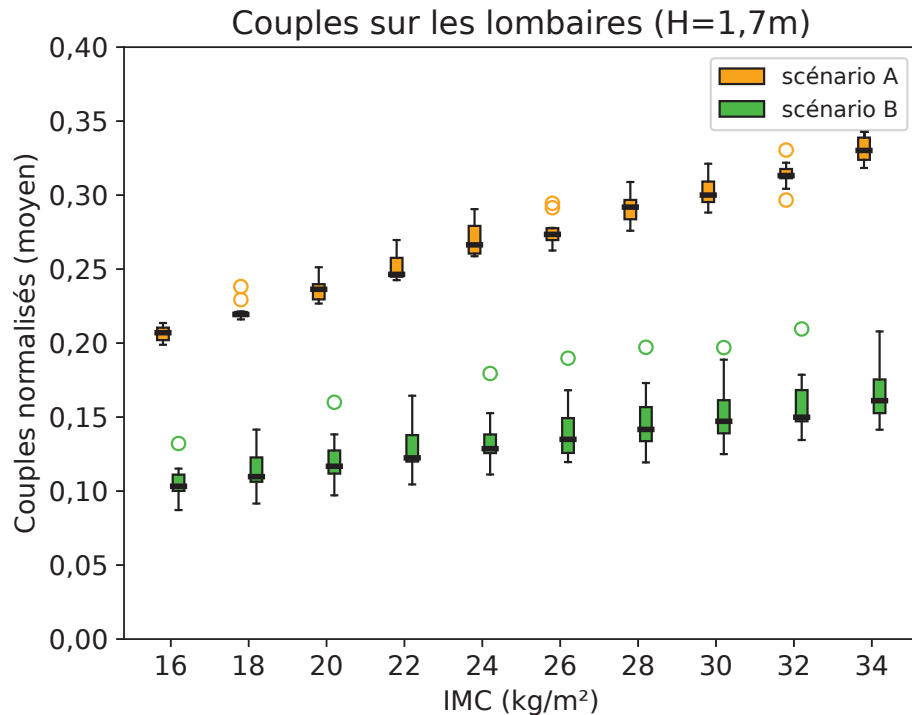


FIGURE 5.13 – Couples normalisés au niveau des lombaires (moyenne sur l'activité) en fonction de la taille et pour un IMC de 24. Les distributions sur les solutions élites de l'ensemble des répétitions sont représentées pour les scénarios A et B.

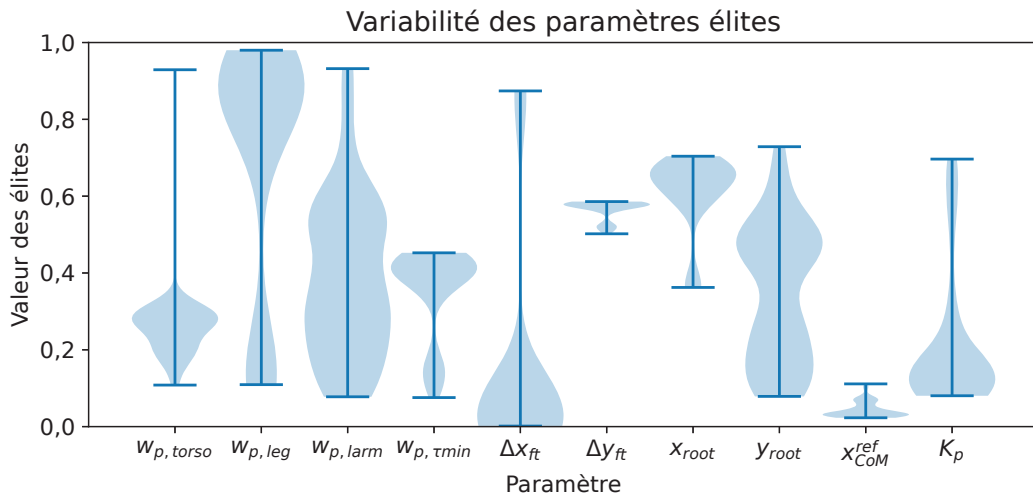
### 5.4.3 Stratégies motrices

Dans cette section, on s'intéresse à l'influence des paramètres sur le comportement de l'humain virtuel. En effet, le comportement observé (phénotype) peut être vu comme l'expression des paramètres (génotype) optimisés par MTME, ces derniers définissant la stratégie motrice de l'individu. Il s'agit de voir si des motifs peuvent être observés sur les valeurs optimales des paramètres à l'échelle de la population. Cette analyse permet d'avoir une meilleure compréhension de l'influence des paramètres sélectionnés sur les comportements observés. L'analyse est effectuée sur la répétition médiane du scénario B.

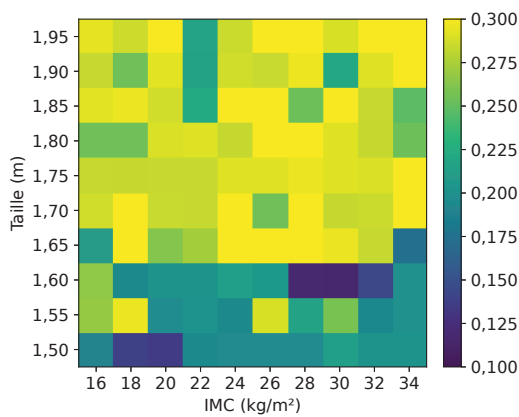
La [figure 5.14a](#) montre la distribution des valeurs de chaque paramètre (voir [tableau 5.1](#)) sur l'ensemble des solutions élites. La plupart de ces distributions sont multi-modales. MTME n'a donc pas convergé vers une solution unique à toutes les morphologies, et trouve au contraire des solutions diverses potentiellement adaptées à chaque morphologie.

Sur la [figure 5.14](#), les cartes des paramètres en fonction de la morphologie sont montrées. Les poids posturaux sur le torse et les jambes (respectivement  $w_{p,\text{torso}}$ ,  $w_{p,\text{leg}}$ ) sont plus faibles pour des morphologies plus petites (voir [figure 5.14b](#) [figure 5.14c](#)). Avec des poids posturaux plus faibles, l'humain virtuel est plus libre de ses mouvements sur les groupes articulaires concernés (torse et jambes). Il peut atteindre des postures plus éloignées de la posture de référence (N-pose), ce qui est nécessaire pour que les petits puissent atteindre les cibles. De même, la référence sur le CdM  $x_{\text{com}}^{\text{ref}}$  augmente (c.-à-d. avance) pour les petites morphologies. Cela leur permet de se pencher plus en avant, mais avec un risque plus important de perdre l'équilibre. Enfin, le poids de la tâche de minimisation des couples  $w_{\tau_{\text{min}}}$  diminue pour des

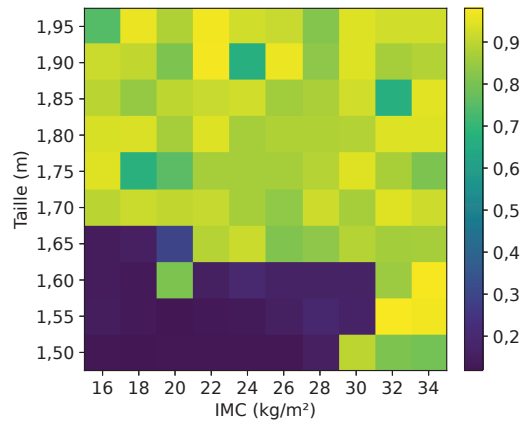




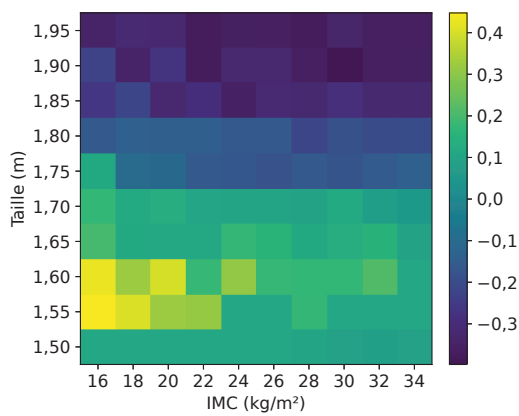
(a) Valeurs des paramètres sur l'ensemble des solutions élités



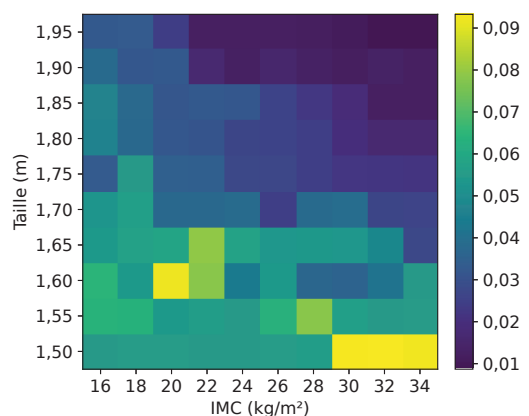
(b)  $w_{p,torso}$



(c)  $w_{p,leg}$



(d)  $x_{COM}^{ref}$



(e)  $w_{\tau_{min}}$

FIGURE 5.14 – (a) Distributions de chaque paramètre optimisé par MTME, à travers les solutions élités, normalisé par rapport à l'intervalle de recherche. (b) - (e) Carte des paramètres optimisés en fonction de la morphologie, pour les paramètres  $w_{p,torso}$ ,  $w_{p,leg}$ ,  $x_{COM}^{ref}$ ,  $w_{\tau_{min}}$  respectivement.

individus plus grands et d'IMC plus élevé (figure 5.14e). En effet, ces morphologies doivent produire des couples articulaires plus élevés pour réaliser correctement l'activité, ce qui implique de réduire l'importance de la régularisation des couples articulaires.

#### 5.4.4 Synthèse

Différents éléments issus des résultats de l'approche ont été analysés pour déterminer si le poste de travail est suffisamment bien conçu pour la population étudiée.

Dans un premier temps, les cartes d'adéquation peuvent servir d'indicateur pour visualiser la performance et l'ergonomie d'un poste de travail pour l'ensemble de la population (sous-section 5.4.1). Avec ces cartes, le scénario A est rapidement identifié comme non adapté pour l'ensemble de la population et plus particulièrement aux individus de petite taille. À l'inverse, le scénario B est globalement plus adapté à la population après avoir ajusté la distance du panneau de vissage.

Dans un second temps, les comportements des humains virtuels sont étudiés pour chaque scénario, afin de mettre en évidence les comportements à risque et d'étudier l'influence de la morphologie sur les comportements (sous-section 5.4.2). Sur le scénario A, la taille de l'humain a un effet important à cause de l'éloignement des cibles et de la portée d'atteinte limitée chez les petits individus. Les plus petits doivent se pencher excessivement vers l'avant pour atteindre les cibles au risque de perdre l'équilibre. Les morphologies d'IMC élevé sont aussi exposées à un risque ergonomique plus élevé à cause des efforts supplémentaires au niveau du dos et du bas du corps, nécessaires pour compenser l'effet de levier provoqué par la masse supplémentaire sur des postures d'atteinte. Sur le scénario B, le fait d'avoir rapproché le panneau de vissage améliore significativement les postures et les couples articulaires pour l'ensemble de la population. Différemment du scénario A, les morphologies de taille intermédiaire (entre 1,75 m et 1,85 m) obtiennent le meilleur  $f_{\text{suit}}$ . Cela s'explique par les deux hauteurs de cibles (resp. basse et haute) qui avantagent soit les petits ou les grands ; les morphologies de taille intermédiaire constituent le meilleur compromis sur la durée entière de l'activité.

Enfin, les valeurs des paramètres des élites sont analysées afin de comprendre les stratégies motrices à l'origine des comportements observés (sous-section 5.4.3). Malgré les interdépendances possibles entre les paramètres optimisés, des motifs ont pu être identifiés sur certains paramètres pour expliquer les comportements générés.

## 5.5 Evaluation des performances de l'approche

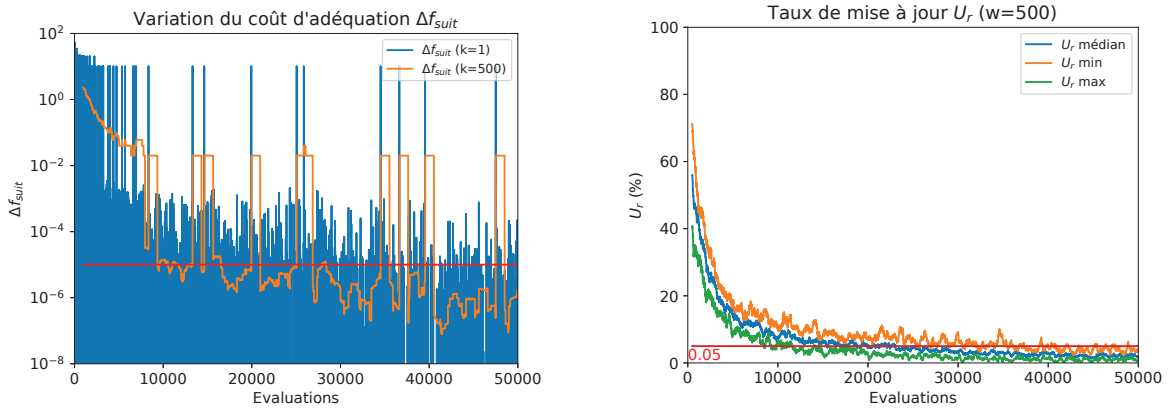
L'approche proposée permet de générer des comportements optimisés pour chacune des morphologies considérées. Cependant, il reste à déterminer à quel point l'approche est performante pour le problème posé par rapport à d'autres approches classiques. Dans cette partie, on se pose principalement les questions suivantes. MTME permet t-il de converger plus vite et avec moins de variabilité par rapport à d'autres méthodes classiques ? Les solutions obtenues avec notre approche sont-elles proches de l'optimum global ? Comment déterminer si les solutions sont suffisamment optimales, sachant que le budget d'évaluation est restreint ?

## 5.5.1 Vitesse de convergence

### 5.5.1.1 Analyse de la convergence

Dans cette partie, l'objectif est d'étudier la vitesse de convergence de MTME et de voir si des critères peuvent être utilisés pour déterminer si un nombre suffisant de simulations a été effectué. En effet, les approches basées sur de l'optimisation stochastique et MAP-Elites nécessitent souvent un nombre très important d'évaluations pour converger. Pour l'application présentée, il n'est pas non plus nécessaire d'avoir la carte d'adéquation optimale pour identifier le sous-espace des morphologies pour lesquelles le poste de travail pose problème. Il s'agit donc de trouver un compromis entre le budget de calcul et le niveau de d'optimisation souhaité sur l'ensemble des comportements.

Pour tenter de quantifier la convergence et de définir un critère arrêt, nous proposons de considérer deux métriques : la variation du coût d'adéquation (*Cost Variation*) et le taux de mise à jour de la carte (*Update Rate*).



(a) Evolution de la variation du coût d'adéquation  $\Delta f_{\text{suit}}$  en fonction du nombre d'évaluation, pour la répétition médiane du scénario A.

(b) Evolution du taux de mise à jour  $U_r$  de l'archive d'élites, sur l'ensemble des répétitions. Le  $U_r$  médian, minimum et maximum sont représentés.

FIGURE 5.15 – Métriques pour analyser la convergence de MTME, appliquées sur les répétitions du scénario A.

**Variation d'adéquation  $\Delta f_{\text{suit}}$**  Soit  $\overline{f_{\text{suit}}}$  le coût d'adéquation moyen sur l'ensemble de la population. La variation du coût d'adéquation (ou *Cost Variation*) notée  $\Delta f_{\text{suit}}$  mesure l'amélioration de  $\overline{f_{\text{suit}}}$  durant l'optimisation. Pour une itération donnée  $i$ ,  $\Delta f_{\text{suit}}^k(i)$  correspond à la moyenne sur les  $k$  dernières itérations de la variation de  $\overline{f_{\text{suit}}}$  entre deux itérations consécutives :

$$\Delta f_{\text{suit}}^k(i) = \frac{1}{k} \sum_{i-k}^i \delta \overline{f_{\text{suit}}}_i \quad (5.20)$$

avec  $\delta \overline{f_{\text{suit}}}_i = \overline{f_{\text{suit}}}_i - \overline{f_{\text{suit}}}_{i-1}$ . Il s'agit en fait d'approximer la dérivée de  $\overline{f_{\text{suit}}}$ , avec une moyenne glissante de fenêtre  $k$  sur  $\delta \overline{f_{\text{suit}}}$ . En effet,  $\delta \overline{f_{\text{suit}}}$  alterne entre des valeurs nulles et non-nulles suivant si l'optimisation trouve une nouvelle élite. La moyenne glissante permet d'en filtrer les valeurs et de mieux distinguer l'évolution de  $\delta \overline{f_{\text{suit}}}$ .

La figure 5.15a montre  $\Delta f_{\text{suit}}$  en fonction de l'itération sur la répétition médiane du scénario A et pour deux tailles de fenêtre ( $k=1$ ,  $k=500$ ). Sur la figure,  $\Delta f_{\text{suit}}^{k=1}$  (en bleu) montre directement l'évolution  $\delta \overline{f_{\text{suit}}}$  sans filtrage. Comme attendu, la courbe est bruitée :

elle alterne entre des valeurs nulles (pas de nouvelle élite), des valeurs faibles (nouvelle élite) et des pics de valeur. Ces pics correspondent aux itérations lors desquelles l'algorithme trouve une solution élite permettant à une nouvelle morphologie de réaliser l'activité ; la morphologie passe alors de  $\mathcal{M}_{p-}$  à  $\mathcal{M}_{p+}$ . La courbe de  $\Delta f_{\text{suit}}^{k=500}$  (en orange) donne la moyenne glissante de  $\delta f_{\text{suit}}$  sur 500 itérations. La valeur diminue avec le nombre d'itérations et atteint le seuil de  $10^{-5}$  à 9000 itérations. Cependant, ce seuil est régulièrement dépassé à cause des nouvelles morphologies parvenant à réaliser l'activité. De plus, le seuil de  $10^{-5}$  fixé arbitrairement dépend entièrement de  $f_{\text{suit}}$  et de l'interprétation qu'on en fait. Si  $f_{\text{suit}}$  était défini sous une forme différente, la valeur du seuil n'aurait pas le même sens.

Ainsi,  $\Delta f_{\text{suit}}$  permet de prendre en compte des variations importantes mais peu fréquentes sur la valeur de  $f_{\text{suit}}$ . Cependant, la définition d'un seuil est plus difficile, à cause des pics d'amélioration qui peuvent survenir aléatoirement et aussi parce que la valeur du seuil dépend de l'interprétation précise de la valeur de  $f_{\text{suit}}$ .

**Taux de mise à jour  $U_r$**  Le taux de mise à jour (ou *Update Rate*) noté  $U_r$  mesure la fréquence de mise à jour de l'archive d'élites. Pour l'itération  $i$ ,  $U_r(i)$  correspond à la proportion d'évaluations ayant donné lieu à une nouvelle solution élite, sur les  $k$  dernières évaluations :

$$U_r(i) = \frac{1}{k} \sum_{i-k}^i (N_{U_r}(i)) \quad (5.21)$$

avec  $N_{U_r}(i) = 0$  s'il n'y a pas de nouvelle élite et  $N_{U_r}(i) = 1$  sinon.

La [figure 5.15b](#) donne l'évolution de  $U_r$  en fonction du nombre d'itération. Les  $U_r$  médian, minimal et maximal sur l'ensemble des répétitions sont représentés pour  $k = 500$ . Au début de l'optimisation (<2000 itérations),  $U_r$  est particulièrement élevé. Durant cette phase, MTME trouve régulièrement de nouvelles élites et l'archive est fréquemment améliorée.  $U_r$  continue de décroître avec le nombre d'itération, avec une pente initialement rapide (jusqu'à environ 10000 itérations) puis une pente plus lente jusqu'aux 50000 itérations. L'évolution de  $U_r$  n'est pas monotone à cause du caractère aléatoire de l'exploration et de la découverte de nouvelles bonnes solutions de manière spontanée. De plus à travers les répétitions, l'écart entre les  $U_r$  minimal et maximal se réduit avec le nombre d'itérations.

Le seuil de  $U_r = 0,05$  est proposé et correspond à une fréquence de mise à jour de 5% sur les 500 dernières itérations. Sur la [figure 5.15b](#), ce seuil est atteint bien avant 50000 itérations pour le  $U_r$  médian (à 15444 itérations), le  $U_r$  minimal (à 8488 itérations) et maximal (à 25434 itérations). Un avantage majeur de définir un seuil sur  $U_r$  est que sa valeur ne dépend pas directement de la signification de  $f_{\text{suit}}$  et qu'il s'agit plutôt d'une mesure liée au fonctionnement de MTME (et des méthodes basées sur la mise à jour d'une archive de solutions de manière plus générale). Si  $f_{\text{suit}}$  devait être défini différemment (avec un  $f_{\text{perf}}$  ou un  $f_{\text{ergo}}$  différent), le même seuil sur  $U_r$  peut être utilisé. Cependant, contrairement à  $\Delta f_{\text{suit}}$ ,  $U_r$  ne prend pas en compte les cas où les mises à jour sont peu fréquentes mais significatives en termes de  $f_{\text{suit}}$ .

Pour conclure, le taux de mise à jour  $U_r$  de la carte a tendance à décroître pour toutes les répétitions et finit par atteindre des valeurs faibles. À ce stade là de l'optimisation, la carte est peu fréquemment mise à jour, avec la plupart du temps des améliorations minimales sur les comportements de l'humain. Il semble alors pertinent de définir un seuil sur  $U_r$  (ici 5%), à partir duquel on considère que la carte n'est plus suffisamment mise à jour pour continuer l'optimisation.

### 5.5.1.2 Comparaison avec d'autres méthodes

Dans l'approche proposée, le problème d'adéquation du poste de travail à une population d'humains est posée comme un problème multi-tâches, puis résolu avec MTME, un algorithme multi-tâches de type « boîte noire » basé sur l'optimisation *Quality-Diversity*. Cependant, d'autres approches pourraient être considérées et jusqu'ici, nous n'avons pas encore montré si notre approche basée sur MTME est réellement plus efficace en calculs par rapport à d'autres méthodes dans l'état de l'art.

Cette partie fait donc écho aux questions posées précédemment ([sous-section 5.3.3](#)) concernant la pertinence d'utiliser un algorithme multi-tâche et de poser le problème comme un problème multi-tâches. La suite présente plusieurs méthodes (*Baselines*) pour comparer les performances de MTME, si le problème général avait été posé et/ou résolu comme un problème d'optimisation *Single-Task*.

**Baselines d'optimisation** Pour le scénario A (supposément le plus difficile), les performances de MTME sont comparées avec d'autres approches d'optimisation classiques. Les algorithmes sont comparés entre eux pour un budget de 30000 évaluation et 10 répétitions chacun. D'après la [figure 5.15b](#), le seuil de 5% est largement atteint pour MTME à 30000 évaluations. Les algorithmes utilisés comme bases de comparaison sont les suivants :

- **CMA-all**. Avec cette approche, on vérifie si le problème d'optimisation multi-tâches est pertinent pour l'application. Au lieu d'optimiser le coût d'adéquation  $f_{\text{suit}}$  de chaque morphologie, la moyenne de  $f_{\text{suit}}$  sur l'ensemble des morphologies  $m \in \mathcal{M}$  est optimisée. L'optimisation est effectuée avec CMA-ES (HANSEN et al., 2001), un algorithme évolutionnaire classique pour les problèmes de type « boîte noire » et *Single-Task*.
- **Random (MAP-Elites)**. Le comportement de chaque morphologie est optimisé aléatoirement. Le processus est similaire à MTME où l'on stocke les meilleures solutions (elites) dans une archive. Cependant à chaque itération, une solution aléatoire est générée et évaluée sur une morphologie aléatoire. Cette méthode permet de converger vers l'optimum global avec un budget suffisamment élevé, et potentiellement trop élevé.
- **CMA-single**. Le comportement de chaque morphologie est optimisé séparément avec CMA-ES. Pour avoir un budget d'évaluation équivalent, chacune des 100 morphologies n'est évaluée que 300 fois.

**Analyse comparative des méthodes** La [figure 5.16](#) donne l'évolution du taux d'échec  $f_{\text{fail}}$  pour MTME et les algorithmes de comparaison présentées ci-dessus. Pour le scénario A, on rappelle que le taux d'échec  $f_{\text{fail}}$  trouvé expérimentalement est de 14% (voir [sous-sous-section 5.5.2.2](#)).

Le taux d'échec médian à 30000 évaluations est le plus élevé pour *CMA-all* avec  $f_{\text{fail}} = 0,58$ , parmi l'ensemble des méthodes. En l'occurrence, *CMA-all* présente de moins bonnes performances qu'une optimisation aléatoire sur le problème multi-tâche (*Random*,  $f_{\text{fail}} = 0,5$ ). Les faibles performances de *CMA-all* suggèrent qu'il est nécessaire de chercher une solution optimale pour chaque morphologie et que le contexte d'optimisation multi-tâches est pertinent.

Toujours pour *CMA-all*, on observe une augmentation spontanée du taux d'échec à 13100 évaluations. En effet, la méthode optimise la moyenne de  $f_{\text{suit}}$  sur l'ensemble de la population, et non le  $f_{\text{fail}}$ . À cause des termes de pénalité ([équation 5.2](#)), une solution qui améliore le  $f_{\text{fail}}$  peut dégrader le  $f_{\text{suit}}$  moyen, si un nombre plus important de morphologies perd l'équilibre.

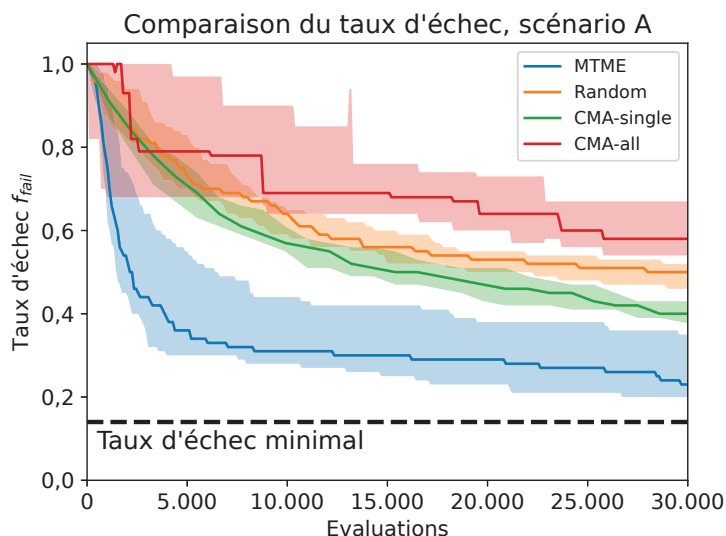


FIGURE 5.16 – Évolution du taux d'échec pour MTME et trois autres méthodes d'optimisation (Random, CMA-single, CMA-all), avec 10 répétitions par méthode. Le graphe donne les taux d'échec médians (ligne continue) ainsi que les taux d'échec minimums et maximums (régions transparentes).

Dans ce cas, les valeurs de pénalité  $p_1$  et  $p_2$  agissent comme des poids de pondération (arbitraires) dans le  $f_{\text{suit}}$  moyen ; la formulation hiérarchique de la fonction de coût perd alors de son intérêt.

À 30000 évaluations, MTME présente de meilleures performances que toutes les autres méthodes avec un taux d'échec de  $f_{\text{fail}} = 0,22$ . Ce taux d'échec est significativement plus bas que celui de *CMA-single* ( $f_{\text{fail}} = 0,4$ ) et *Random* ( $f_{\text{fail}} = 0,5$ ). MTME présente une certaine variabilité entre les répétitions, avec une différence de 0,11 entre la meilleure et la pire répétition. La pire répétition de MTME fait tout de même mieux que la meilleure répétition de n'importe quelle autre méthode. De plus, si on regarde la vitesse de convergence, MTME atteint le taux d'échec final de *CMA-single* 6,5 fois plus vite, et celui de *Random* 14 fois plus vite. L'optimisation multi-tâches basée sur MAP-Elites permet de trouver plus rapidement de bonnes solutions par rapport à des méthodes basées sur de l'optimisation *single-task*.

Ainsi, pour étudier l'adéquation d'un poste de travail pour une population d'humains, il semble nécessaire d'optimiser le comportement de chaque individu (problème multi-tâches) et d'utiliser un algorithme d'optimisation multi-tâche tel que MTME pour réduire grandement le nombre d'évaluations.

### 5.5.2 Optimalité des solutions

Sur les résultats présentés, une question importante à se poser est de savoir si les comportements obtenus sont suffisamment optimisés. En effet, de multiples facteurs peuvent être à l'origine de résultats sous-optimaux à l'issue de l'optimisation proposée. Par exemple, le nombre d'évaluation est insuffisant et l'algorithme n'a pas convergé. Ou bien, l'algorithme converge prématurément et se trouve bloqué dans un minimum local. Dans le cadre d'algorithmes évolutionnaires de type *Quality-Diversity*, cela est typiquement dû à un manque de diversité lié à une taille de population trop restreinte ou un processus évolutif trop conservateur.

Cependant, l'optimalité et la convergence sont des aspects difficiles à étudier pour des algorithmes de type *Quality-Diversity* (et pour les algorithmes évolutionnaires de manière générale). Dans notre problème, la valeur optimale à atteindre sur  $f_{\text{suit}}^*$  n'est pas connue à l'avance pour n'importe laquelle des morphologies. Durant l'optimisation, il n'est pas non plus possible de savoir à quel point l'optimum est proche. Dans la pratique, il faut alors choisir un nombre d'évaluations suffisamment élevé et espérer que l'algorithme converge. Dans la suite, on regarde s'il est possible d'obtenir une approximation du minimum global de  $f_{\text{suit}}^*$  pour quelques morphologies. Ensuite, on s'intéresse à une métrique alternative pour évaluer l'optimalité, en se basant sur le taux d'échec.

### 5.5.2.1 Optimalité sur $f_{\text{suit}}$

Le but est d'obtenir une approximation du minimum global de  $f_{\text{suit}}$  (c.-à-d. trouver le meilleur comportement possible en termes de performance et ergonomie) pour chaque individu de la population étudiée. Pour y arriver, il est nécessaire d'effectuer un grand nombre d'évaluations par morphologie, sans aucune garantie que l'optimum global ait été trouvé pour chacune des morphologies. L'espace de recherche est de dimension élevée et le paysage de la fonction de coût est fortement discontinu (à cause de la dynamique on/off des contacts principalement) avec potentiellement de nombreux minimas locaux. L'étude de l'optimalité serait donc extrêmement coûteuse en temps de calcul. C'est pourquoi, l'étude est limitée à quelques morphologies.

**Méthode d'approximation** Pour avoir une approximation de  $f_{\text{suit}}^*$  pour une morphologie donnée, l'idée consiste à optimiser pour cette morphologie avec un budget d'évaluation bien plus élevé, c'est-à-dire largement supérieur au budget alloué pour le cas d'usage (en moyenne 500 par morphologie). Pour prendre en compte le phénomène de convergence prématurée, l'optimisation doit être répétée plusieurs fois, en conservant la meilleure solution à travers les répétitions.

L'étude porte sur le scénario A, afin de voir l'effet sur les deux parties du paysage de  $f_{\text{suit}}$ . Deux morphologies dans  $\mathcal{M}_{p+}$  ( $\{H=1,7\text{ m}, \text{IMC}=24\}$ ,  $\{H=1,95\text{ m}, \text{IMC}=36\}$ ) et deux morphologies dans  $\mathcal{M}_{p-}$  ( $\{H=1,5\text{ m}, \text{IMC}=16\}$ ,  $\{H=1,5\text{ m}, \text{IMC}=36\}$ ) sont sélectionnées.

Pour chaque morphologie, le comportement est optimisé avec CMA-ES. Tout comme MTME, CMA-ES suit un processus d'optimisation stochastique lié à une stratégie d'évolution. Pour chaque morphologie, l'optimisation avec CMA-ES est répétée 5 fois. On considère que CMA-ES a convergé lorsque le pas de progression est suffisamment faible ( $\sigma < 10^{-7}$ ), ou lorsque 20000 évaluations ont été effectuées pour une morphologie.

Les résultats obtenus servent ensuite de référence de comparaison pour les résultats obtenus avec MTME sur le cas d'usage (section 5.3). Il s'agit de vérifier à quel point les  $f_{\text{suit}}$  optimisés avec CMA-ES sont variables et sont proches des  $f_{\text{suit}}$  obtenus avec MTME.

**Résultats et discussions** La figure 5.17 compare les distributions sur  $f_{\text{perf}}$  et  $f_{\text{ergo}}$  des solutions élites pour l'ensemble des répétitions de MTME, CMA-single, Random et CMA-ES (budget large). La comparaison se fait sur le scénario A et pour la morphologie moyenne et quelques morphologies extrêmes. Pour chaque méthode, 10 répétitions sont considérées.

Pour les morphologies dans  $\mathcal{M}_{p-}$  (c.-à-d. qui finissent la simulation mais sans réaliser l'activité), on rappelle que  $f_{\text{suit}}$  équivaut à  $f_{\text{perf}}$  à un terme de pénalité près (équation 5.2b). La figure 5.17a compare les distributions de  $f_{\text{perf}}$  pour deux morphologies dans  $\mathcal{M}_{p-}$  : celles de taille minimale avec respectivement l'IMC le plus faible et le plus élevé (respectivement  $m_1 = \{H=1,5\text{ m}, \text{IMC}=16\}$  et  $m_2 = \{H=1,5\text{ m}, \text{IMC}=34\}$ ). Pour  $m_1$ , les valeurs de  $f_{\text{perf}}$  pour



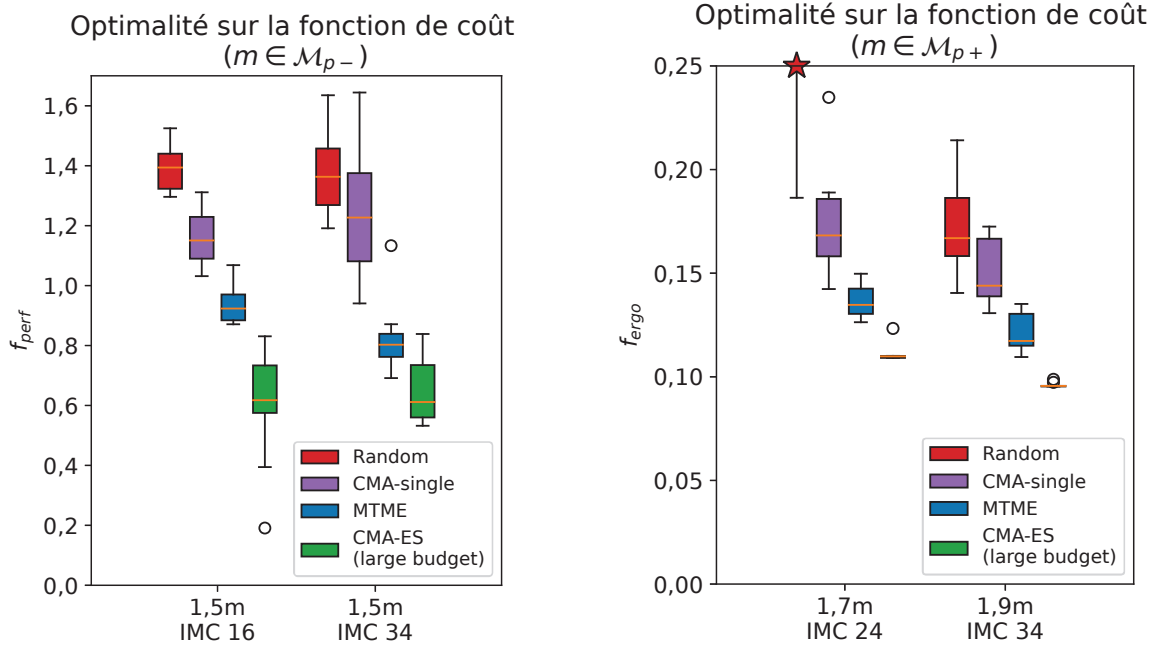
(a) Distribution du coût de performance  $f_{\text{perf}}$  pour deux morphologies dans  $\mathcal{M}_{p-}$ .(b) Distribution du coût ergonomique  $f_{\text{ergo}}$  pour deux morphologies dans  $\mathcal{M}_{p+}$ .

FIGURE 5.17 – Comparaison des résultats sur l'ensemble des essais effectués, entre les *baselines* (MTME, CMA-single, Random) et CMA-ES (large budget), pour quelques morphologies sur le scénario A. Sur la figure de droite, avec *Random*, la solution élite ne permet pas de générer un comportement valide sur certains essais. L'étoile rouge sert à indiquer que la distribution sort largement de l'échelle affichée (à cause du terme de pénalité).

MTME sont significativement plus élevées que celles pour CMA-ES. La valeur médiane de  $f_{\text{perf}}$  passe de 0,61 (CMA-ES) à 0,92 (MTME) et les distributions ne se recoupent pas. Une des répétitions de CMA-ES parvient à trouver une solution avec un  $f_{\text{perf}}$  particulièrement bas à 0,19. Pour  $m_2$ , la distribution des  $f_{\text{perf}}$  pour MTME est plus proche de celle pour CMA-ES : sur certains essais, MTME parvient à trouver de meilleurs résultats que certains essais de CMA-ES. Pour les deux morphologies, les valeurs de  $f_{\text{perf}}$  pour MTME restent nettement meilleures que pour *CMA-single* ou *Random*. Enfin, dans les deux cas, la variabilité de  $f_{\text{perf}}$  sur l'élite semble particulièrement élevée avec CMA-ES. L'algorithme converge vers des solutions distinctes d'un essai à l'autre. Les morphologies dans  $\mathcal{M}_{p-}$  se mettent dans des postures en limite d'équilibre pour atteindre les cibles (figure 5.6). Une explication serait donc que l'optimisation explore, pour ces morphologies, des solutions proches de discontinuités sur le paysage de  $f_{\text{perf}}$ , causées par les chutes.

Pour les morphologies dans  $\mathcal{M}_{p+}$ ,  $f_{\text{suit}}$  est équivalent à  $f_{\text{ergo}}$  (équation 5.2c). Dans la figure 5.17b, les distributions de  $f_{\text{ergo}}$  sont comparées pour la morphologie moyenne ( $m_3 = \{H=1,7\text{m}, \text{IMC}=24\}$ ) et pour la morphologie la plus imposante ( $m_4 = \{H=1,95\text{m}, \text{IMC}=34\}$ ). Le coût  $f_{\text{ergo}}$  de MTME reste relativement proche de celui de la référence CMA-ES. Pour  $m_3$ , le  $f_{\text{ergo}}$  médian est de 0,1347 pour MTME contre 0,1099 pour CMA-ES ; pour  $m_4$ , on passe de 0,1173 (MTME) à 0,0956 (CMA-ES). Encore une fois, MTME présente des valeurs de  $f_{\text{ergo}}$  significativement plus faibles que *Random* et *CMA-single*. Ici en revanche, la

variabilité sur  $f_{\text{ergo}}$  est très faible pour les élites de CMA-ES. Pour ces morphologies, l'humain virtuel reste généralement loin de configurations instables : le paysage de  $f_{\text{ergo}}$  est alors discontinu et plus facile à optimiser.

Pour conclure, le problème a été optimisé avec CMA-ES avec un budget large, afin d'avoir une approximation d'un  $f_{\text{suit}}$  optimal avec laquelle comparer les résultats obtenus avec MTME. Il s'agit cependant d'un processus coûteux et limité ici à quelques morphologies. Pour les morphologies étudiées, MTME ne parvient pas à atteindre  $f_{\text{suit}}^*$  mais s'en rapproche raisonnablement bien en comparaison avec les autres baselines (*CMA-single* et *Random*) et compte tenu du budget d'évaluation limité. La méthode d'approximation de  $f_{\text{suit}}^*$  proposée montre cependant ses limites sur les espaces où  $f_{\text{suit}}$  est plus difficile à optimiser : pour les morphologies dans  $\mathcal{M}_p$ , la variabilité des résultats est importante sur les essais de CMA-ES.

### 5.5.2.2 Taux d'échec $f_{\text{fail}}$

Dans cette partie, on souhaite introduire une autre manière moins coûteuse pour dire si un résultat est proche ou non de l'optimalité. Pour simplifier le problème, on considère le taux d'échec (noté  $f_{\text{fail}}$ ) qui définit la proportion d'individus n'arrivant pas à réaliser l'activité. Le taux d'échec est une bonne approximation de la fonction d'adéquation  $f_{\text{suit}}$  : lorsqu'un individu échoue à réaliser l'activité, les termes de pénalité dominent les autres termes ( $f_{\text{perf}}$  et  $f_{\text{ergo}}$ ) dans  $f_{\text{suit}}$ . De plus avec  $f_{\text{fail}}$ , on peut considérer qu'un algorithme a convergé pour une morphologie dès qu'il trouve une solution valide (c.-à-d. permettant de réaliser l'activité). En revanche avec  $f_{\text{suit}}$ , il n'est pas possible d'estimer a priori à quelle distance on se trouve de l'optimum global pour la morphologie, il est toujours possible de trouver une meilleure solution.

**Méthode d'approximation** Pour estimer une limite de convergence basée sur  $f_{\text{fail}}$ , l'idée est de continuer à optimiser avec un budget plus large pour toutes les morphologies n'ayant pas réussi à réaliser l'activité sur l'ensemble des simulations précédemment présentées. Pour chacune de ces morphologies, on effectue 5 répétitions de 20000 évaluations avec CMA-ES, similairement à l'analyse d'optimalité sur  $f_{\text{suit}}$  (sous-sous-section 5.5.2.1). Le budget choisi est suffisamment large pour que l'algorithme converge (c.-à-d. pas d'améliorations sur un grand nombre d'évaluations). Si une solution valide est trouvée parmi les répétitions, la morphologie est capable d'effectuer l'activité et le taux d'échec est abaissé.

**Résultats et discussion** Sur le scénario A, le taux d'échec finalement obtenu est de  $f_{\text{rate}} = 0,14$  sur l'ensemble de la population. Pour rappel, sur le cas d'usage, le taux d'échec sur la répétition médiane de MTME était de  $f_{\text{rate}} = 0,22$ . L'erreur sur le taux d'échec est donc significatif.

En regardant plus en détail, sur les 14 morphologies qui ne parviennent pas à réaliser l'activité, on trouve toutes celles de taille  $H=1,5$  m et certaines de taille  $H=1,55$  m. Parmi les morphologies invalides et de taille  $H=1,55$  m, on retrouve celles d'IMC élevé (ce qui rejoint l'analyse effectuée dans la section 5.4) mais aussi celles d'IMC faible. Il serait intéressant d'étudier plus en détail ce phénomène.

En termes de taux d'échec, la conclusion reste ici similaire malgré la différence de résultats : le poste de travail n'est pas adapté pour des morphologies de petite taille. Avec MTME, le budget limité fait que certaines morphologies valides se retrouvent écartées. D'un point de vue applicatif, cela donnerait lieu à une évaluation de l'adéquation du poste de travail plus conservatrice.

## 5.6 Conclusion

**Synthèse du chapitre** Dans ce chapitre, une nouvelle approche est présentée pour étudier l'adéquation d'un poste de travail à une large population d'humains de morphologies différentes. L'approche combine la simulation physique d'humains virtuels animés avec un contrôleur corps-complet et un optimiseur multi-tâches pour optimiser le comportement de chaque individu. Pour une activité donnée et pour chaque morphologie, il s'agit de trouver le comportement le plus ergonomique et permettant de faire au mieux l'activité.

L'approche est démontrée sur une activité de vissage et pour 100 morphologies différentes paramétrées en taille et en IMC. À travers deux scénarios de l'activité, les résultats d'optimisation peuvent être analysés pour identifier des défauts de conception sur un poste de travail, pour le rendre mieux adapté à l'ensemble de la population. La carte d'adéquation permet une visualisation globale de l'adéquation du poste de travail sur l'ensemble de la population et d'identifier immédiatement si le scénario est problématique pour un sous-ensemble de la population. L'influence de la morphologie sur les comportements et les risques associés peut être étudié en analysant diverses grandeurs cinématiques et dynamiques mesurées en simulation. Avec cela, les facteurs de risque ont été identifiés sur le premier scénario (A), permettant une nette amélioration des comportements en termes de performances et d'ergonomie sur le deuxième scénario (B).

Enfin, les performances de l'approche sont évaluées. Le budget d'évaluation étant limité, MTME n'atteint pas l'optimum global sur les simulations effectuées mais s'en rapproche. En comparaison avec d'autres algorithmes d'optimisation, MTME nécessite un budget d'évaluation bien plus faible pour trouver de bonnes solutions optimisées spécifiquement pour chaque morphologie.

**Application à d'autres cas d'usage** Ici, une preuve de concept est présentée pour répondre au problème posé (sous-section 5.2.1), c'est-à-dire évaluer l'adéquation de postes de travail pour une large population d'humains. De nombreux éléments de la méthode pourraient être modifiés et adaptés à d'autres scénarios, sans pour autant changer l'approche générale proposée.

Pour l'espace des tâches (au sens de MTME), la taille et l'IMC permettent de produire une large population de morphologies différentes. D'autres populations d'humains virtuels pourraient être générées, en prenant en compte d'autres dimensions morphologiques pertinentes pour le cas d'usage (sous-sous-section 5.2.3.2). La génération des morphologies pourrait mieux prendre en compte les données réelles issues de base de données anthropométriques et les distributions des caractéristiques morphologiques au sein de la population. En effet, les morphologies extrêmes (c.-à-d. situées aux extrémités de l'espace des morphologies) sont peu représentées dans une population réelle de travailleurs. Dans nos résultats, une importance similaire est cependant accordée pour toutes les morphologies. Pour répondre à ce problème, des distributions d'IMC et de taille issues de données démographiques pourraient servir à générer les populations d'humains virtuels ou pour calculer un score d'adéquation  $f_{\text{suit}}$  plus représentatif de la population réelle. L'espace des tâches ne serait alors plus représentable sous forme d'une grille de morphologies. VASSILIADES et al. (2018) proposent de définir les tâches comme des centroïdes avec une région de Voronoï. L'avantage majeur de cette approche est d'être applicable sur un espace (morphologique) de dimensions plus élevé, ce qui est intéressant si l'on récupère des morphologies finement paramétrées issues de données anthropométriques réelles.

Pour l'espace de recherche, les paramètres optimisés ont été sélectionnés pour être génériques et donc applicables pour diverses morphologies et scénarios. Sur le cas d'usage (activité de vissage), des comportements adaptés à chaque morphologie ont pu être générés sur les deux scénarios (A et B). Cependant, les comportements générés à travers les morphologies restent relativement similaires. Il serait intéressant d'explorer des méthodes, pour enrichir les comportements de l'humain virtuel et potentiellement généraliser l'approche à une plus grande variété de postes de travail. Pour cela, à plus bas niveau, d'autres ensembles de paramètres auraient pu être sélectionnés (p. ex. au niveau du contrôleur QP, le poids de la tâche de CdM, de la tâche cartésienne ou de la tâche posturale du cou) En effet, ici, le problème d'optimisation des comportements est posé comme un problème de type boîte noire. Il n'y a en théorie pas de restrictions sur la nature des paramètres optimisés en entrée de MTME. De plus, le contrôleur corps-complet pourrait être formulé différemment et couplé avec des méthodes de planification afin de générer des comportements dynamiques nécessitant d'optimiser la commande sur plusieurs pas de temps. Des exemples d'améliorations incluent l'ajout d'une planification des trajectoires cartésiennes de références ou la prise en compte des auto-collisions. Les contacts multiples entre l'humain virtuel et son environnement pourraient être mieux gérés, en cherchant notamment des positions voire des séquences de points de contact optimales. Dans le cas d'usage présenté, l'humain virtuel aurait pu s'appuyer sur le bord du convoyeur avec la main gauche ou la cuisse. L'implémentation de nouveaux comportements dans le contrôleur introduit potentiellement de nouveaux paramètres optimisables avec l'approche présentée.

Pour la définition de la fonction de coût  $f_{\text{suit}}$  à optimiser, le choix des couples articulaires normalisés est intéressant pour les raisons précédemment évoquées (sous-section 5.2.3.2). D'autres indicateurs pourraient être optimisés, par exemple les grandeurs analysées pour étudier le comportement des humains (sous-section 5.4.2) tel que la marge du CdM, l'angle du dos ; d'autres indicateurs ergonomiques pourraient aussi être optimisés (voir sous-section 2.2.3). Des travaux futures intéressants consisteraient à comparer les comportements à l'échelle de la population avec différentes fonctions d'objectif, voire avec de l'optimisation multi-objectif (GOMES et al., 2022), ce qui permettrait aussi d'étudier la variabilité des comportements au sein de chaque morphologie.

Ces éléments de réponse concernant l'espace des tâches, l'espace de recherche et la fonction de coût cherchent toutes à répondre à la question ouverte suivante :

**Question 5.1**

Comment enrichir les comportements de l'humain virtuel et généraliser à des scénarios plus dynamiques, sans exploser le coût computationnel ?

De plus, les performances de l'approche sont évaluées mais seulement comparées avec d'autres méthodes en simulation. Il serait intéressant de pouvoir comparer les résultats, à l'aide de données réelles issues d'un opérateur industriel et d'ergonomes experts pour évaluer l'utilisabilité de l'approche et vérifier si les résultats sont cohérents.

**Question 5.2**

Comment valider l'approche proposée en termes d'ergonomie mais aussi d'utilisabilité ?

Le chapitre suivant s'attardera plus en détails sur les perspectives d'améliorations mais aussi d'application de l'approche proposée. Des éléments de réponse sont donnés pour ces perspectives et ouvrent la voie à d'autres travaux possibles.

# Chapitre 6

## Conclusion générale

Dans cette thèse, des éléments de méthode ont été proposés afin d'étudier l'influence de la morphologie sur l'ergonomie de poste de travail. Cette section fait une synthèse des réponses apportées aux problèmes de la thèse et montre les perspectives possibles pour des travaux futurs.

### 6.1 Synthèse des travaux

Dans cette thèse, l'objectif est de proposer des outils basés sur la simulation pour évaluer l'ergonomie des postes de travail sur une grande variété de morphologies d'humain. Pour comprendre précisément le contexte scientifique lié à la problématique, les études épidémiologiques existantes sur les facteurs de risque liés à la morphologie sont présentées dans le [chapitre 2](#). Ces preuves motivent l'objectif de la thèse et donnent des données de référence sur le terrain pour relier les facteurs morphologiques aux TMS. Les outils de simulation d'humains virtuels ne remplacent pas les études épidémiologiques, mais permettent des analyses ergonomiques détaillées pour des postes de travail en cours de conception. Il existe différentes approches pour modéliser et animer une variété de morphologies d'humains. De manière générale, le choix des outils est motivé par le réalisme de la simulation (au niveau des mouvements et efforts générés) et contraint par le budget computationnel et le manque de modèles sur les phénomènes en jeu.

Pour répondre à l'objectif, les travaux de la thèse font usage d'une approche émergente en ergonomie, basée sur la simulation physique d'humains virtuels couplée à du contrôle corps-complet. La simulation physique permet de générer des comportements qui respectent les contraintes liées à la physique. Le contrôleur corps-complet permet un calcul rapide de la commande articulaire, tout en étant potentiellement applicable à différentes morphologies et activités industrielles, à condition de régler correctement les tâches et les contraintes du contrôleur. Sur la base de cette approche, deux contributions sont présentées pour répondre aux sous-problèmes de la thèse.

**Réponse à la problématique n°1** Un premier défi de la thèse ([Problème 1.1](#)) consiste à faciliter l'animation en simulation physique d'humains virtuels de morphologies différentes. Avec nos outils de simulation, la mise en posture de l'humain virtuel présente des difficultés, causées par les contraintes imposées par la physique, et plus généralement par le mode d'interaction et de visualisation classiquement basé sur la 2D (c.-à-d. écran d'ordinateur).

Pour répondre au problème, nous proposons une interface basée sur la réalité virtuelle pour mettre en posture l'humain virtuel. L'utilisateur peut ajuster les postures de l'humain virtuel de manière interactive, avec une visualisation immersive des mouvements et des couples fournis durant l'effort. L'outil est appliqué sur un scénario de pointage avec trois morphologies différentes (petite, moyenne et grande). Dans les résultats, les postures et les efforts générés sont cohérents par rapport à la morphologie et à la hauteur des cibles. La même configuration du contrôleur permet d'interagir avec les trois morphologies du scénario. Cependant, les morphologies simulées sont proches : pour simuler des morphologies très distinctes, une configuration du contrôleur adaptée pour chaque morphologie est nécessaire.

**Réponse à la problématique n°2** Un second défi de la thèse ([Problème 1.2](#)) consiste à générer des comportements morpho-spécifiques (c.-à-d. adapté à la morphologie) pour une large population avec un coût en calcul raisonnable. Dans les travaux existants, la résolution de ce type de problème passe par l'utilisation d'optimiseurs « boîte noire ». Cette approche nécessite en général une quantité élevée de simulations. L'application d'une telle approche dans notre cas semble particulièrement coûteux si l'optimisation doit être répétée sur l'ensemble des individus de la population.

Pour répondre au problème, nous proposons une méthode basée sur l'optimisation multi-tâches. Une variante multi-tâches de l'algorithme MAP-Elites permet d'optimiser les paramètres du contrôleur QP d'un grand nombre de morphologies, par rapport à des critères d'ergonomie et de performance sur la réalisation de l'activité. L'approche est appliquée sur deux variantes d'une activité de vissage avec 100 morphologies différentes. Dans les résultats, l'adéquation d'un poste de travail pour une population peut être visualisée globalement avec l'aide de cartes. Ces cartes peuvent servir d'indicateur pour identifier des défauts de conception entre plusieurs propositions de postes de travail. Les comportements générés sont morpho-spécifiques et permettent d'analyser l'effet de la morphologie sur les facteurs de risque physique.

## 6.2 Perspectives

Les contributions de la thèse donnent des éléments de réponses pour mieux prendre en compte la morphologie des travailleurs dans un contexte d'ergonomie. Outre les réponses apportées, les travaux ouvrent plusieurs perspectives de travaux futurs. Dans la suite du chapitre, nous présentons les améliorations possibles basées sur les résultats actuels et des suggestions de pistes de recherche et d'application possibles.

### 6.2.1 Validation expérimentale

Pour chaque contribution de thèse, l'approche est présentée et appliquée à un cas d'usage particulier afin d'en illustrer le fonctionnement. Une étape suivante consiste à évaluer dans des situations concrètes si les outils proposés peuvent aider les ergonomes et les concepteurs dans leur travail.

Dans la contribution du [chapitre 4](#), l'outil proposé a pour but de faciliter la mise en posture d'humains virtuels grâce à une interface immersive en réalité virtuelle. L'utilisabilité de l'outil reste cependant à évaluer. En particulier, il s'agit de déterminer si notre approche fait mieux que des approches classiques (p. ex. écran 2D), en évaluant notamment les critères suivants : la facilité de prise en main et le gain en efficacité pour mettre en posture l'humain virtuel et



évaluer l'ergonomie. L'étude de validation pourrait faire intervenir un panel d'ergonomes et se baser sur des questionnaires pour évaluer les critères évoqués et identifier les avantages et les limites spécifiques à notre approche.

Dans la contribution du [chapitre 5](#), la méthode présentée a pour objectif d'étudier l'adéquation d'un poste de travail à une large population d'individus. Ici, pour une activité donnée, on veut savoir si les résultats obtenus pour la population étudiée sont cohérents par rapport aux recommandations existantes en ergonomie et en conception des postes de travail. Pour vérifier cela, l'étude de validation consisterait à comparer la carte d'adéquation issue de notre approche avec des cartes proposées par des concepteurs expérimentés. Pour différents scénarios (simulés au préalable avec notre approche), les concepteurs donnent une estimation des cartes d'adéquation basée sur leurs connaissances. L'expert pourrait être interrogé afin d'expliquer ses choix et interpréter les éventuelles différences avec les résultats issus de notre approche.

Toujours sur le [chapitre 5](#), la plausibilité des mouvements et des efforts générés à travers la population doit être vérifiée. Une première idée de validation consiste à demander à des ergonomes de juger si les mouvements (ou postures) de l'humain virtuel sont optimaux pour l'activité en question. Cette approche se base sur l'expérience subjective de l'ergonome, avec des résultats potentiellement différents d'un ergonome à l'autre. Une autre méthode de validation possible serait de comparer les mouvements générés avec ceux de travailleurs réels en capture de mouvement, et plus précisément de vérifier si l'ergonomie et la performance sont similaires. Cependant, notre approche considère le comportement le plus ergonomique permettant de réaliser l'activité : il faut alors se comparer avec des travailleurs expérimentés susceptibles d'effectuer le mouvement optimal en termes d'ergonomie. Une autre difficulté est liée à la variabilité du mouvement : il existe potentiellement plusieurs stratégies très distinctes, pour une performance et un niveau de risque ergonomique similaire.

### 6.2.2 Amélioration des comportements

Dans les contributions présentées, les mouvements de l'humain virtuel restent simples, avec des mouvements peu dynamiques et des interactions limitées avec l'environnement virtuel et le poste de travail. Pour de futurs travaux, il serait intéressant d'enrichir les comportements de l'humain virtuel par rapport à ceux générés dans le [chapitre 4](#) et le [chapitre 5](#). D'une part, des comportements encore mieux adaptés à la morphologie pourraient potentiellement être trouvés si l'espace des comportements générables est agrandi. D'autre part, une variété plus importante de scénarios de postes de travail pourrait être prise en compte.

Pour simuler des comportements plus complexes, des méthodes de planification seront nécessaires. En effet, le contrôleur QP utilisé est purement réactif : le contrôleur ne considère qu'un seul pas de temps dans le calcul de la commande en couples articulaires.

Sur des activités où l'humain se déplace dans le poste de travail, des méthodes de locomotion doivent être considérées. Par exemple, un modèle simplifié de marche tel que le Linear Inverted Pendulum Model (KAJITA et al., 2003) couplé à un contrôleur prédictif (MPC) pourrait être implémenté dans l'architecture de contrôle existante. Cependant, ce type d'approche ne permet pas forcément de générer des mouvements de locomotion qui ressemblent à ceux d'un humain réel.

Sur les activités manuelles de manière générale, l'humain peut s'aider de l'environnement pour se faciliter la tâche, typiquement en trouvant des points d'appui pouvant impliquer différentes parties du corps. Par exemple, dans le cas d'usage du [chapitre 5](#), l'humain peut s'appuyer sur le bord du convoyeur avec la main gauche ou la cuisse, pour atteindre plus



facilement les cibles. Pour générer automatiquement de telles stratégies, des méthodes d'optimisation multi-contact peuvent être utilisées (BOUYARMANE et al., 2019), pour planifier la séquence de contacts et calculer la commande de l'humain permettant d'exécuter ce plan. Le principal problème lié à ce type d'approche réside dans le coût d'optimisation démultiplié dans notre cas par le nombre de morphologies à évaluer.

Dans une perspective plus lointaine, on souhaite idéalement disposer d'un contrôleur générique capable d'effectuer n'importe quel mouvement observable chez l'humain et applicable sur différentes morphologies. À cet égard, les méthodes basées sur l'apprentissage par renforcement profond ont montré récemment des résultats prometteurs pour reproduire des comportements humains hautement dynamiques en simulation physique. Ces méthodes sont capables d'apprendre des contrôleurs capables de généraliser sur divers mouvements et morphologies (PENG et al., 2018). Cependant, ces approches présentent encore plusieurs limitations majeures, à savoir le coût élevé d'entraînement et surtout la configurabilité limitée du contrôleur appris. Typiquement, ces méthodes apprennent une correspondance directe entre les mouvements de référence (issus de la capture de mouvements) et la commande articulaire, sans modélisation explicite de la dynamique. Il existe donc une difficulté à générer de la variabilité de mouvement, sans avoir à spécifier des variables supplémentaires en entrée de la politique d'action avant l'entraînement.

Enfin, pour générer des comportements morpho-spécifiques (dans le cadre du chapitre 5), l'optimiseur multi-tâches (c.-à-d. Multi-Task MAP-Elites) doit être interfacé avec les approches mentionnées ci-dessus. Peu importe l'approche, des paramètres pertinents (c.-à-d. permettant de générer une variété de comportements) doivent être identifiés au niveau du contrôleur, afin de trouver des comportements adaptés à la morphologie à l'issue de l'optimisation comportementale.

### 6.2.3 Optimisation du poste de travail

Dans un contexte de conception des postes de travail, il serait intéressant d'optimiser la configuration du poste de travail. Dans le chapitre 5, la configuration du poste de travail étudié est ajustée manuellement, après avoir optimisé et analysé les comportements des humains. Cependant, l'optimisation du poste de travail ajouterait une étape d'optimisation supplémentaire et potentiellement coûteuse : cela impliquerait d'explorer différentes configurations du poste de travail en vérifiant à chaque fois l'adéquation pour l'ensemble de la population étudiée.

Une piste de solution serait d'optimiser simultanément le comportement de l'humain (via les paramètres du contrôleur) et la configuration du poste de travail. Dans Multi-Task MAP-Elites, les dimensions de l'espace de recherche sont génériques. Plusieurs questions se posent alors, sur la manière de paramétrer l'espace de travail (par rapport aux dimensions des humains virtuels), sur les performances de l'approche, etc. Cette idée est particulièrement intéressante pour des postes de travail dont les dimensions sont ajustables (p. ex. sièges ou bureaux ergonomiques). Une application concrète serait de préconfigurer de manière optimale chaque poste de travail par rapport à la morphologie du travailleur.

### 6.2.4 Variabilité intra-morphologique

Pour un poste de travail et pour une morphologie donnés, il existe potentiellement une multitude de comportements distincts, mais valides en termes d'ergonomie et de performance sur l'activité. Cette variabilité des comportements intra-morphologiques (c.-à-d. au sein d'une

morphologie) est importante à prendre en compte. En effet, un poste de travail doit idéalement être adapté par rapport à l'ensemble des comportements possibles (et valides) d'un individu. Dans le [chapitre 5](#), le comportement généré pour une morphologie ne correspond pas forcément au comportement le plus représentatif pour cette morphologie, dans la distribution des comportements valides.

L'approche présentée dans le [chapitre 5](#) pourrait permettre d'étudier cette variabilité de comportement dans une certaine mesure. L'algorithme explore de nombreuses solutions pour chaque morphologie, qui peuvent conduire à des comportements différents mais proches en termes d'ergonomie et de performance. Pour de futurs travaux, il serait intéressant de guider spécifiquement l'optimisation pour rechercher une diversité de solutions pour chaque morphologie. (ANNE et al., 2023) présentent une variante multi-comportementale de Multi-Task MAP-Elites pour trouver efficacement un grand nombre de bonnes solutions pour de nombreuses tâches (c.-à-d. morphologies dans notre cas). Une autre idée serait d'ajouter une composante multi-objective à Multi-Task MAP-Elites : il s'agit alors de trouver le front de Pareto des comportements optimaux par rapport à plusieurs critères liés à la performance et à l'ergonomie.

Ces approches permettraient donc de générer non pas un comportement optimal (comme dans le [chapitre 5](#)) mais un ensemble de comportements optimaux (ou proche de l'optimalité) qui représentent mieux les comportements possibles chez l'humain. Cela permettrait d'avoir une vue globale des stratégies comportementales à travers les morphologies et d'identifier des stratégies partagées par certains groupes d'individus.

Pour conclure, cette thèse a traité d'un problème connu de longue date en ergonomie, c.-à-d. la prise en compte de la morphologie des travailleurs, mais avec des méthodes récentes qui ont permis d'apporter de nouveaux éclairages sur le sujet. En particulier, les travaux se basent sur la simulation physique d'humains virtuels et introduisent des approches originales pour faire de la mise en posture immersive et pour générer efficacement des comportements morfo-spécifiques, sur une grande variété de morphologies. Ces méthodes visent à aider les ergonomes et les concepteurs des postes de travail à détecter au plus tôt des défauts de conception qui rendent un poste de travail inadéquat pour une partie de la population. À cet effet, les comportements morfo-spécifiques générés avec notre approche permettent de mieux comprendre l'effet de la morphologie en termes d'ergonomie et d'ajuster les postes de travail en conséquence.

Plus largement, ces travaux de thèses visent à améliorer les conditions de travail des travailleurs, par la prévention du développement des troubles musculo-squelettiques. Les outils développés ouvrent la voie à des postes de travail adaptés à la morphologie des travailleurs, afin de garantir au mieux leur bien-être sur le long terme.



# Bibliographie

- ABDEL-MALEK, K., J. ARORA, R. BHATT, K. FARRELL, C. MURPHY et K. KREGEL (2019). « Santos : An Integrated Human Modeling and Simulation Platform ». In : *DHM and Posturography*. Academic Press, p. 63-77.
- ABDUL-MASSIH, M., I. YOO et B. BENES (2017). « Motion Style Retargeting to Characters With Different Morphologies ». In : *Computer Graphics Forum* 36.6, p. 86-99.
- ACGIH (2024). *Threshold Limit Values for Chemical Substances and Physical Agents & Biological Exposure Indices*. American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH).
- AFNOR (2008). *NF EN 1005-4+A1 Sécurité des machines - Performance physique humaine - Partie 4 : évaluation des postures et mouvements lors du travail en relation avec les machines*. Association française de normalisation (AFNOR).
- ANNE, T. et J.-B. MOURET (2023). « Multi-Task Multi-Behavior MAP-Elites ». In : *Proceedings of the Companion Conference on Genetic and Evolutionary Computation*. Association for Computing Machinery, p. 111-114.
- ARISTIDOU, A., J. LASENBY, Y. CHRYSANTHOU et A. SHAMIR (2018). « Inverse Kinematics Techniques in Computer Graphics : A Survey ». In : *Computer Graphics Forum* 37.6, p. 35-58.
- ARISTIDOU, A. et J. LASENBY (2011). « FABRIK : A Fast, Iterative Solver for the Inverse Kinematics Problem ». In : *Graphical Models* 73.5, p. 243-260.
- ASSURANCE MALADIE (2020). *Troubles musculo-squelettiques (TMS)*. URL : <https://www.ameli.fr/assure/sante/themes/tms/comprendre-troubles-musculosquelettiques>.
- AUER, P., N. CESA-BIANCHI et P. FISCHER (2002). « Finite-Time Analysis of the Multiarmed Bandit Problem ». In : *Machine Learning* 47.2, p. 235-256.
- BALTZOPOULOS, V. (2007). « Isokinetic Dynamometry ». In : *Biomechanical Evaluation of Movement in Sport and Exercise*. 1<sup>re</sup> éd. Routledge, p. 117-142.
- BARROSO, M. P., P. M. AREZES, L. G. da COSTA et A. SÉRGIO MIGUEL (2005). « Anthropometric Study of Portuguese Workers ». In : *International Journal of Industrial Ergonomics* 35.5, p. 401-410.
- BAYRAMOĞLU, M., M. N. AKMAN, S. KILINÇ, N. CETIN, N. YAVUZ et R. OZKER (2001). « Isokinetic Measurement of Trunk Muscle Strength in Women with Chronic Low-Back Pain ». In : *American Journal of Physical Medicine & Rehabilitation* 80.9, p. 650-655.
- BERGAMIN, K., S. CLAVET, D. HOLDEN et J. RICHARD FORBES (2019). « DReCon : Data-driven Responsive Control of Physics-Based Characters ». In : *ACM Transactions on Graphics* 38.6, p. 1-11.
- BERRET, B., I. DELIS, J. GAVEAU et F. JEAN (2019). « Optimality and Modularity in Human Movement : From Optimal Control to Muscle Synergies ». In : *Biomechanics of anthropomorphic systems* 124, p. 105-133.

- BEVAN, S. (2015). « Economic Impact of Musculoskeletal Disorders (MSDs) on Work in Europe ». In : *Best Practice and Research : Clinical Rheumatology* 29.3, p. 356-373.
- BONNEY, M. C., K. CASE, B. J. HUGHES, D. N. KENNEDY et R. W. WILLIAMS (1974). *Using SAMMIE for Computer-Aided Workplace and Work Task Design*. SAE Technical Paper 740270.
- BOTHA, W. E. et R. S. BRIDGER (1998). « Anthropometric Variability, Equipment Usability and Musculoskeletal Pain in a Group of Nurses in the Western Cape ». In : *Applied Ergonomics* 29.6, p. 481-490.
- BOUYARMANE, K., S. CARON, A. ESCANDE et A. KHEDDAR (2019). « Multi-Contact Motion Planning and Control ». In : *Humanoid Robotics : A Reference*, p. 1763-1804.
- BROLIN, E., D. HÖGBERG, L. HANSON et R. ÖRTENGREN (2017). « Adaptive Regression Model for Synthesizing Anthropometric Population Data ». In : *International Journal of Industrial Ergonomics* 59, p. 46-53.
- BUCKLE, P. et J. BUCKLE (2011). « Obesity, Ergonomics and Public Health ». In : *Perspectives in Public Health* 131.4, p. 170-176.
- CARPENTIER, J., G. SAUREL, G. BUONDONNO, J. MIRABEL, F. LAMIRAUX, O. STASSE et N. MANSARD (2019). « The Pinocchio C++ Library – A Fast and Flexible Implementation of Rigid Body Dynamics Algorithms and Their Analytical Derivatives ». In : *IEEE International Symposium on System Integrations (SII)*, p. 614-619.
- CAVUOTO, L. A., M. PAJOUTAN et R. K. MEHTA (2019). « Reliability Analyses and Values of Isometric Shoulder Flexion and Trunk Extension Strengths Stratified by Body Mass Index ». In : *PLOS ONE* 14.7, e0219090.
- CHAFFIN, D. B. (2008). « Digital Human Modeling for Workspace Design ». In : *Reviews of Human Factors and Ergonomics* 4.1, p. 41-74.
- CHAFFIN, D. B., G. B. J. ANDERSSON et B. J. MARTIN (2006). *Occupational Biomechanics*. 4<sup>e</sup> éd. Wiley.
- CHAFFIN, D. B. et M. ERIG (1991). « Three-Dimensional Biomechanical Static Strength Prediction Model Sensitivity to Postural and Anthropometric Inaccuracies ». In : *IIE Transactions* 23.3, p. 215-227.
- CHAFFIN, D. B., J. J. FARAWAY, X. ZHANG et C. WOOLLEY (2000). « Stature, Age, and Gender Effects on Reach Motion Postures ». In : *Human Factors : The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society* 42.3, p. 408-420.
- CHARBONNEAU, M., V. MODUGNO, F. NORI, G. ORIOLO, D. PUCCI et S. IVALDI (2018). « Learning Robust Task Priorities of QP-Based Whole-Body Torque-Controllers ». In : *2019 IEEE-RAS 19th International Conference on Humanoid Robots (Humanoids)*, pp. 1-9.
- CHARLAND, J. (2019). « Chapter 9 - Virtual Ergonomics by Dassault Systèmes ». In : *DHM and Posturography*. Academic Press, p. 97-103.
- CHOI, S., M. PAN et J. KIM (2020). « Nonparametric Motion Retargeting for Humanoid Robots on Shared Latent Space ». In : *Robotics : Science and Systems 2020*.
- CHUNG, M. K. et K. CHOI (1997). « Ergonomic Analysis of Musculoskeletal Discomforts among Conversational VDT Operators ». In : *Computers & Industrial Engineering* 33.3-4, p. 521-524.
- COLE, D. C. et I. RIVILIS (2004). « Individual Factors and Musculoskeletal Disorders : A Framework for Their Consideration ». In : *Journal of Electromyography and Kinesiology* 14.1, p. 121-127.

- DAMSGAARD, M., J. RASMUSSEN, S. T. CHRISTENSEN, E. SURMA et M. de ZEE (2006). « Analysis of Musculoskeletal Systems in the AnyBody Modeling System ». In : *Simulation Modelling Practice and Theory* 14.8, p. 1100-1111.
- DARVISH, K., Y. TIRUPACHURI, G. ROMUALDI, L. RAPETTI, D. FERIGO, F. J. A. CHAVEZ et D. PUCCI (2019). « Whole-Body Geometric Retargeting for Humanoid Robots ». In : *2019 IEEE-RAS 19th International Conference on Humanoid Robots (Humanoids)*, p. 679-686.
- DARVISHI, E., F. GHASEMI, F. SADEGHI, K. ABEDI, S. RAHMATI et G. SADEGHZADE (2022). « Risk Assessment of the Work-Related Musculoskeletal Disorders Based on Individual Characteristics Using Path Analysis Models ». In : *BMC Musculoskeletal Disorders* 23.1, p. 616.
- DAVID, G. C. (2005). « Ergonomic Methods for Assessing Exposure to Risk Factors for Work-Related Musculoskeletal Disorders ». In : *Occupational Medicine* 55.3, p. 190-199.
- DE MAGISTRIS, G., A. MICAELLI, P. EVRARD, C. ANDRIOT, J. SAVIN, C. GAUDEZ et J. MARSOT (2013). « Dynamic Control of DHM for Ergonomic Assessments ». In : *International Journal of Industrial Ergonomics* 43.2, p. 170-180.
- DEL PRETE, A. (2018). « Joint Position and Velocity Bounds in Discrete-Time Acceleration/Torque Control of Robot Manipulators ». In : *IEEE Robotics and Automation Letters* 3.1, p. 281-288.
- DEL PRETE, A., N. MANSARD, O. E. RAMOS, O. STASSE et F. NORI (2016). « Implementing Torque Control with High-Ratio Gear Boxes and Without Joint-Torque Sensors ». In : *International Journal of Humanoid Robotics* 13.1, p. 1550044.
- DELLVE, L., L. AHLSTROM, A. JONSSON, L. SANDSJÖ, M. FORSMAN, A. LINDEGÅRD, C. AHLSTRAND, R. KADEFORS et M. HAGBERG (2011). « Myofeedback Training and Intensive Muscular Strength Training to Decrease Pain and Improve Work Ability among Female Workers on Long-Term Sick Leave with Neck Pain : A Randomized Controlled Trial ». In : *International Archives of Occupational and Environmental Health* 84.3, p. 335-346.
- DELP, S. L., F. C. ANDERSON, A. S. ARNOLD, P. LOAN, A. HABIB, C. T. JOHN, E. GUENDELMAN et D. G. THELEN (2007). « OpenSim : Open-source Software to Create and Analyze Dynamic Simulations of Movement ». In : *IEEE Transactions on Biomedical Engineering* 54.11, p. 1940-1950.
- DRILLIS, R., R. CONTINI et M. BLUESTEIN (1964). « A Survey of Measurement Techniques ». In : *Artificial Limbs* 8.1, p. 44-46.
- DUL, J., P. DE VLAMING et M. MUNNIK (1996). « A Review of ISO and CEN Standards on Ergonomics ». In : *International Journal of Industrial Ergonomics* 17.3, p. 291-297.
- ESCANDE, A., N. MANSARD et P.-B. WIEBER (2014). « Hierarchical Quadratic Programming : Fast Online Humanoid-Robot Motion Generation ». In : *The International Journal of Robotics Research* 33.7, p. 1006-1028.
- FABER, A., L. SELL, J. V. HANSEN, H. BURR, T. LUND, A. HOLTERRMANN et K. SØGAARD (2012). « Does Muscle Strength Predict Future Musculoskeletal Disorders and Sickness Absence ? ». In : *Occupational Medicine* 62.1, p. 41-46.
- FLASH, T. et N. HOGAN (1985). « The Coordination of Arm Movements : An Experimentally Confirmed Mathematical Model ». In : *Journal of Neuroscience* 5.7, p. 1688-1703.
- FORD, L. E., A. J. DETTERLINE, K. K. HO et W. CAO (2000). « Gender- and Height-Related Limits of Muscle Strength in World Weightlifting Champions ». In : *Journal of Applied Physiology* 89.3, p. 1061-1064.



- FRAGOSO, P. E. (2020). « Introducing Multivariate Anthropometry in Digital Human Modelling ». In : *DHM2020 : Proceedings of the 6th International Digital Human Modeling Symposium*, p. 28-39.
- FRYAR, C. D., Q. GU et C. L. OGDEN (2012). « Anthropometric Reference Data for Children and Adults : United States, 2007-2010 ». In : *Vital and Health Statistics. Series 11, Data from the National Health Survey 252*, p. 1-48.
- GLEICHER, M. (1998). « Retargetting Motion to New Characters ». In : *Proceedings of the 25th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, SIGGRAPH 1998*, p. 33-42.
- GOLDFARB, D. et A. IDNANI (1983). « A Numerically Stable Dual Method for Solving Strictly Convex Quadratic Programs ». In : *Mathematical Programming* 27.1, p. 1-33.
- GOLDMANN, J.-P. et G.-P. BRÜGGEMANN (2012). « The Potential of Human Toe Flexor Muscles to Produce Force ». In : *Journal of Anatomy* 221.2, p. 187-194.
- GOMES, W., P. MAURICE, E. DALIN, J.-B. MOURET et S. IVALDI (2022). « Multi-Objective Trajectory Optimization to Improve Ergonomics in Human Motion ». In : *IEEE Robotics and Automation Letters* 7.1, p. 342-349.
- GORDON, C. C., C. L. BLACKWELL, B. BRADTMILLER, J. L. PARHAM, P. BARRIENTOS, S. PAQUETTE, B. CORNER, J. CARSON, J. VENEZIA, B. M. ROCKWELL, M. MUCHER et S. KRISTENSEN (2014). *2012 Anthropometric Survey of U.S. Army Personnel : Methods and Summary Statistics*. Army Natick Soldier Research Development and Engineering Center MA, Technical Report.
- GUPTA, A., Y.-S. ONG et L. FENG (2016). « Multifactorial Evolution : Toward Evolutionary Multitasking ». In : *IEEE Transactions on Evolutionary Computation* 20.3, p. 343-357.
- HAMBERG-VAN REENEN, H. H., G. A. M. ARIËNS, B. M. BLATTER, W. van MECHELEN et P. M. BONGERS (2007). « A Systematic Review of the Relation between Physical Capacity and Future Low Back and Neck/Shoulder Pain ». In : *PAIN* 130.1, p. 93-107.
- HANSEN, N. et A. OSTERMEIER (2001). « Completely Derandomized Self-Adaptation in Evolution Strategies ». In : *Evolutionary Computation* 9.2, p. 159-195.
- HANSON, L., D. HÖGBERG, J. S. CARLSON, N. DELFS, E. BROLIN, P. MÅRDBERG, D. SPENSIERI, S. BJÖRKENSTAM, J. NYSTRÖM et F. ORE (2019). « Industrial Path Solutions – Intelligently Moving Manikins ». In : *DHM and Posturography*. Academic Press, p. 115-124.
- HARRIS, T. (1997). « Muscle Mass and Strength : Relation to Function in Population Studies1 ». In : *The Journal of Nutrition* 127.5, p. 1004-1006.
- HECKER, C., B. RAABE, R. W. ENSLOW, J. DEWEESE, J. MAYNARD et K. van PROOIJEN (2008). « Real-Time Motion Retargeting to Highly Varied User-Created Morphologies ». In : *ACM Transactions on Graphics* 27.3, p. 1-11.
- HIGGINS, D. M., E. BUTA, A. A. HEAPY, M. A. DRISCOLL, R. D. KERNS, R. MASHEB, W. C. BECKER, L. R. M. HAUSMANN, M. J. BAIR, L. WANDNER, E. A. JANKE, C. A. BRANDT et J. L. GOULET (2020). « The Relationship Between Body Mass Index and Pain Intensity Among Veterans with Musculoskeletal Disorders : Findings from the MSD Cohort Study ». In : *Pain Medicine* 21.10, p. 2563-2572.
- HIGNETT, S. et L. MCATAMNEY (2000). « Rapid Entire Body Assessment ». In : *Applied Ergonomics* 31.2, p. 201-205.
- HÖGBERG, D., E. BROLIN et L. HANSON (2015). « Accommodation Levels for Ellipsoid Versus Cuboid Defined Boundary Cases ». In : *Procedia Manufacturing* 3, p. 3702-3708.



- HOLZBAUR, K. R. S., W. M. MURRAY et S. L. DELP (2005). « A Model of the Upper Extremity for Simulating Musculoskeletal Surgery and Analyzing Neuromuscular Control ». In : *Annals of Biomedical Engineering* 33.6, p. 829-840.
- HOOFMAN, W. E., M. J. WESTERMAN, A. J. van der BEEK, P. M. BONGERS et W. van MECHELEN (2008). « What Makes Men and Women with Musculoskeletal Complaints Decide They Are Too Sick to Work ? » In : *Scandinavian Journal of Work, Environment & Health* 34.2, p. 107-112.
- HULENS, M., G. VANSANT, R. LYSSENS, A. CLAESSENS, E. MULS et S. BRUMAGNE (2001). « Study of Differences in Peripheral Muscle Strength of Lean versus Obese Women : An Allometric Approach ». In : *International Journal of Obesity* 25.5, p. 676-681.
- IEA (2021). *What Is Ergonomics (HFE) ? - International Ergonomics Association*. URL : <https://iea.cc/about/what-is-ergonomics/>.
- ISO (2000). *ISO 11226 :2000 Ergonomie — Évaluation des postures de travail statiques*. International Organization for Standardization (ISO).
- (2007a). *ISO 11228-2 :2007 Ergonomie — Manutention manuelle — Partie 2 : Actions de pousser et de tirer*. International Organization for Standardization (ISO).
- (2007b). *ISO 11228-3 :2007 Ergonomie — Manutention manuelle — Partie 3 : Manipulation de charges faibles à fréquence de répétition élevée*. International Organization for Standardization (ISO).
- (2017). *ISO 7250-1 :2017 Définitions des mesures de base du corps humain pour la conception technologique — Partie 1 : Définitions des mesures du corps et repères*. International Organization for Standardization (ISO).
- (2021). *ISO 11228-1 :2021 Ergonomie — Manutention manuelle — Partie 1 : Manutention verticale vers le haut, manutention verticale vers le bas et manutention horizontale*. International Organization for Standardization (ISO).
- (2022). *ISO 15537 :2022 Principes de choix et d'utilisation de sujets d'essai pour l'essai des aspects anthropométriques des produits industriels et leur conception*. International Organization for Standardization (ISO).
- IVALDI, S., O. SIGAUD, B. BERRET et F. NORI (2012). « From Humans to Humanoids : The Optimal Control Framework ». In : *Paladyn, Journal of Behavioral Robotics* 3.2, p. 75-91.
- JAFFAR, N., A. ABDUL-THARIM, I. MOHD-KAMAR et N. LOP (2011). « A Literature Review of Ergonomics Risk Factors in Construction Industry ». In : *Procedia Engineering* 20, p. 89-97.
- JAMES, P. T. (2004). « Obesity : The Worldwide Epidemic ». In : *Clinics in Dermatology* 22.4, p. 276-280.
- JAMES, S. L. et al. (2018). « Global, Regional, and National Incidence, Prevalence, and Years Lived with Disability for 354 Diseases and Injuries for 195 Countries and Territories, 1990–2017 : A Systematic Analysis for the Global Burden of Disease Study 2017 ». In : *The Lancet* 392.10159, p. 1789-1858.
- KAJITA, S., F. KANEHIRO, K. KANEKO, K. FUJIWARA, K. HARADA, K. YOKOI et H. HIRUKAWA (2003). « Biped Walking Pattern Generation by Using Preview Control of Zero-Moment Point ». In : *2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. T. 2, p. 1620-1626.
- KANOUN, O., F. LAMIRAUX et P.-B. WIEBER (2011). « Kinematic Control of Redundant Manipulators : Generalizing the Task-Priority Framework to Inequality Task ». In : *IEEE Transactions on Robotics* 27.4, p. 785-792.

- KARHU, O., R. HÄRKÖNEN, P. SORVALI et P. VEPSÄLÄINEN (1981). « Observing Working Postures in Industry : Examples of OWAS Application ». In : *Applied Ergonomics* 12.1, p. 13-17.
- KHAPUGIN, E. et A. GRISHANIN (2019). « Physics-Based Character Animation with Cascadeur ». In : *ACM SIGGRAPH 2019 Studio*.
- KIM, S., C. KIM et J. H. PARK (2006). « Human-like Arm Motion Generation for Humanoid Robots Using Motion Capture Database ». In : *2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, p. 3486-3491.
- KOENEMANN, J., A. DEL PRETE, Y. TASSA, E. TODOROV, O. STASSE, M. BENNEWITZ et N. MANSARD (2015). « Whole-Body Model-Predictive Control Applied to the HRP-2 Humanoid ». In : *2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, p. 3346-3351.
- KUORINKA, I., B. JONSSON, A. KILBOM, H. VINTERBERG, F. BIERING-SØRENSEN, G. ANDERSSON et K. JØRGENSEN (1987). « Standardised Nordic Questionnaires for the Analysis of Musculoskeletal Symptoms ». In : *Applied Ergonomics* 18.3, p. 233-237.
- LAAL, F., F. MOHAMMADIAN, A. KHOSHAKHLAGH, R. F. MADVARI, S. F. DEGHAN et S. R. PORDANJANI (2022). « Effect of Anthropometric and Demographic Factors on Musculoskeletal Disorders in Nurses' Aides ». In : *Work* 72.4, p. 1205-1213.
- LAFORTUNA, C. L., N. A. MAFFIULETTI, F. AGOSTI et A. SARTORIO (2005). « Gender Variations of Body Composition, Muscle Strength and Power Output in Morbid Obesity ». In : *International Journal of Obesity* 29.7, p. 833-841.
- LAMBERTI, F., A. CANNAVO et P. MONTUSCHI (2020). « Is Immersive Virtual Reality the Ultimate Interface for 3D Animators? » In : *Computer* 53.4, p. 36-45.
- LECOMPTE, J., O. MAISETTI, A. GUILLAUME, W. SKALLI et P. PORTERO (2007). « Agonist and Antagonist EMG Activity of Neck Muscles during Maximal Isometric Flexion and Extension at Different Positions in Young Healthy Men and Women ». In : *Isokinetics and Exercise Science* 15.1, p. 29-36.
- LEE, C.-Y., R. KRATTER, N. DUVOISIN, A. TASKIN et J. SCHILLING (2005). « Cross-Sectional View of Factors Associated with Back Pain ». In : *International Archives of Occupational and Environmental Health* 78.4, p. 319-324.
- LEE, S. (2021). « Learning a Family of Motor Skills from a Single Motion Clip ». In : *ACM Transactions on Graphics* 40.4, p. 1-13.
- LEHMAN, J. et K. O. STANLEY (2011). « Evolving a Diversity of Virtual Creatures through Novelty Search and Local Competition ». In : *Proceedings of the 13th Annual Conference on Genetic and Evolutionary Computation - GECCO '11*. ACM Press, p. 211.
- LI, G., Q. ZHANG et W. GAO (2018). « Multipopulation Evolution Framework for Multifactorial Optimization ». In : *Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference Companion*. Association for Computing Machinery, p. 215-216.
- MALTHA, J. et J. WISMANS (1980). « MADYMO-crash Victim Simulations, a Computerised Research and Design Tool ». In : HS-030 723.
- MASTALLI, C., R. BUDHIRAJA, W. MERKT, G. SAUREL, B. HAMMOUD, M. NAVEAU, J. CARPENTIER, L. RIGHETTI, S. VIJAYAKUMAR et N. MANSARD (2020). « Crocoddyl : An Efficient and Versatile Framework for Multi-Contact Optimal Control ». In : *2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, p. 2536-2542.
- MAURICE, P. (2015). « Virtual Ergonomics for the Design of Collaborative Robots ».
- MAURICE, P., V. PADOIS, Y. MEASSON et P. BIDAUD (2017). « Human-Oriented Design of Collaborative Robots ». In : *International Journal of Industrial Ergonomics* 57, p. 88-102.

- MAYNARD, H. B., G. J. STEGEMERTEN et J. L. SCHWAB (1948). *Methods-Time Measurement*. McGraw-Hill.
- MCATAMNEY, L. et N. CORLETT (1993). « RULA : A Survey Method for the Investigation of Work-Related Upper Limb Disorders ». In : *Applied Ergonomics* 24.2, p. 91-99.
- MCDANIEL, J. W. (1976). « Computerized Biomechanical Man-Model ». In : *Proceedings of the Human Factors Society Annual Meeting* 20.16, p. 384-389.
- MELZACK, R. (1975). « The McGill Pain Questionnaire : Major Properties and Scoring Methods ». In : *PAIN* 1.3, p. 277-299.
- MERLHIOT, X., J. LE GARREC, G. SAUPIN et C. ANDRIOT (2012). « The XDE Mechanical Kernel : Efficient and Robust Simulation of Multibody Dynamics with Intermittent Nonsmooth Contacts ». In : *Proceedings of the 2nd Joint International Conference on Multibody System Dynamics*, p. 84.
- MESSING, K., C. CHATIGNY et J. COURVILLE (1998). « 'Light' and 'heavy' Work in the Housekeeping Service of a Hospital ». In : *Applied Ergonomics* 29.6, p. 451-459.
- MIRANDA, H., E. VIIKARI-JUNTURA, R. MARTIKAINEN, E. TAKALA et H. RIIHIMAKI (2001). « A Prospective Study of Work Related Factors and Physical Exercise as Predictors of Shoulder Pain ». In : *Occupational and Environmental Medicine* 58.8, p. 528-534.
- MOORE, J. S. et A. GARG (1995). « The Strain Index : A Proposed Method to Analyze Jobs For Risk of Distal Upper Extremity Disorders ». In : *American Industrial Hygiene Association Journal* 56.5, p. 443-458.
- MORDATCH, I., E. TODOROV et Z. POPOVIĆ (2012). « Discovery of Complex Behaviors through Contact-Invariant Optimization ». In : *ACM Transactions on Graphics* 31.4, p. 1-8.
- MORDEN, A., C. JINKS et B. N. ONG (2014). « Understanding Help Seeking for Chronic Joint Pain : Implications for Providing Supported Self-Management ». In : *Qualitative Health Research* 24.7, p. 957-968.
- MORO, F. L. et L. SENTIS (2019). « Whole-Body Control of Humanoid Robots ». In : *Humanoid Robotics : A Reference*. Springer, p. 1161-1183.
- MOURET, J.-B. et J. CLUNE (2015). « Illuminating Search Spaces by Mapping Elites ». In : *arXiv preprint*.
- MOURET, J.-B. et G. MAGUIRE (2020). « Quality Diversity for Multi-task Optimization ». In : *Proceedings of the 2020 Genetic and Evolutionary Computation Conference*, p. 121-129.
- OCCHIPINTI, E. (1998). « OCRA : A Concise Index for the Assessment of Exposure to Repetitive Movements of the Upper Limbs ». In : *Ergonomics* 41.9, p. 1290-1311.
- ORIN, D. E. et A. GOSWAMI (2008). « Centroidal Momentum Matrix of a Humanoid Robot : Structure and Properties ». In : *2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, p. 653-659.
- EU-OSHA et I. ISUSI (2020). *Work-Related Musculoskeletal Disorders : Facts and Figures : Synthesis Report (of 10 National Reports)*. Office des publications de l'Union européenne.
- PARSONS, K. C., B. SHACKEL et B. METZ (1995). « Ergonomics and International Standards : History, Organizational Structure and Method of Development ». In : *Applied Ergonomics* 26.4, p. 249-258.
- PENCO, L., B. CLEMENT, V. MODUANO, E. MINGO HOFFMAN, G. NAVA, D. PUCCI, N. G. TSAGARAKIS, J. B. MOURERT et S. IVALDI (2018). « Robust Real-Time Whole-Body Motion Retargeting from Human to Humanoid ». In : *2018 IEEE-RAS 18th International Conference on Humanoid Robots (Humanoids)*, p. 425-432.

- PENCO, L., E. M. HOFFMAN, V. MODUGNO, W. GOMES, J. B. MOURET et S. IVALDI (2020). « Learning Robust Task Priorities and Gains for Control of Redundant Robots ». In : *IEEE Robotics and Automation Letters* 5.2, p. 2626-2633.
- PENG, X. B., P. ABBEEL, S. LEVINE et M. VAN DE PANNE (2018). « DeepMimic : Example-guided Deep Reinforcement Learning of Physics-Based Character Skills ». In : *ACM Transactions on Graphics* 37.4, p. 1-14.
- PHEASANT, S. (1988). *Bodyspace : Anthropometry, Ergonomics and the Design of Work, Second Edition*. 2<sup>e</sup> éd. Taylor & Francis.
- RASCHKE, U. et C. CORT (2019). « Siemens Jack ». In : *DHM and Posturography*. Academic Press, p. 35-48.
- ROBINETTE, K., H. DAANEN et E. PAQUET (1999). « The CAESAR Project : A 3-D Surface Anthropometry Survey ». In : *Second International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling*, p. 380-386.
- ROUX, J., S. SAMADI, E. KUROIWA, T. YOSHIIKE et A. KHEDDAR (2021). « Control of Humanoid in Multiple Fixed and Moving Unilateral Contacts ». In : *2021 20th International Conference on Advanced Robotics (ICAR)*, p. 793-799.
- SALINI, J., V. PADOIS et P. BIDAUD (2011). « Synthesis of Complex Humanoid Whole-Body Behavior : A Focus on Sequencing and Tasks Transitions ». In : *2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, p. 1283-1290.
- SCHAUB, K. G., J. MÜHLSTEDT, B. ILLMANN, S. BAUER, L. FRITZSCHE, T. WAGNER, A. C. B. HOFFMANN et R. BRUDER (2012). « Ergonomic Assessment of Automotive Assembly Tasks with Digital Human Modelling and the 'ergonomics Assessment Worksheet' (EAWS) ». In : *International Journal of Human Factors Modelling and Simulation* 3.3/4, p. 398-426.
- SHARMA, S., V. TRIPATHI, P. SINGH et P. PANDEY (2023). « Exploring The Potential of VR Interfaces in Animation : A Comprehensive Review ». In : *2023 International Conference on Advancement in Computation & Computer Technologies (InCACCT)*. IEEE, p. 1-6.
- SICILIANO, B. et J.-J. SLOTINE (1991). « A General Framework for Managing Multiple Tasks in Highly Redundant Robotic Systems ». In : *Fifth International Conference on Advanced Robotics 'Robots in Unstructured Environments*. T. 2, p. 1211-1216.
- TAN, G., M. P. JENSEN, J. I. THORNBY et B. F. SHANTI (2004). « Validation of the Brief Pain Inventory for Chronic Nonmalignant Pain ». In : *The Journal of Pain* 5.2, p. 133-137.
- TASSA, Y., T. EREZ et E. TODOROV (2012). « Synthesis and Stabilization of Complex Behaviors through Online Trajectory Optimization ». In : *2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, p. 4906-4913.
- TIMPKA, S., I. F. PETERSSON, C. ZHOU et M. ENGLUND (2013). « Muscle Strength in Adolescent Men and Future Musculoskeletal Pain : A Cohort Study with 17 Years of Follow-Up ». In : *BMJ Open* 3.5, e002656.
- TODOROV, E. et M. I. JORDAN (1998). « Smoothness Maximization along a Predefined Path Accurately Predicts the Speed Profiles of Complex Arm Movements ». In : *Journal of Neurophysiology* 80.2, p. 696-714.
- TONNEAU, S., A. DEL PRETE, J. PETTRÉ, C. PARK, D. MANOCHA et N. MANSARD (2018). « An Efficient Acyclic Contact Planner for Multiped Robots ». In : *IEEE Transactions on Robotics* 34.3, p. 586-601.
- TORGÉN, M., L. PUNNETT, L. ALFREDSSON et Å. KILBOM (1999). « Physical Capacity in Relation to Present and Past Physical Load at Work : A Study of 484 Men and Women Aged 41 to 58 Years ». In : *American Journal of Industrial Medicine* 36.3, p. 388-400.



- VAN EERD, D., C. MUNHALL, E. IRVIN, D. REMPEL, S. BREWER, A. J. VAN DER BEEK, J. T. DENNERLEIN, J. TULLAR, K. SKIVINGTON, C. PINION et B. AMICK (2016). « Effectiveness of Workplace Interventions in the Prevention of Upper Extremity Musculoskeletal Disorders and Symptoms : An Update of the Evidence ». In : *Occupational and Environmental Medicine* 73.1, p. 62-70.
- VASSILIADES, V. et J.-B. MOURET (2018). « Discovering the Elite Hypervolume by Leveraging Interspecies Correlation ». In : *Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference*, p. 149-156.
- VOGEL, D., P. LUBOS et F. STEINICKE (2018). « AnimationVR - Interactive Controller-based Animating in Virtual Reality ». In : *2018 IEEE 1st Workshop on Animation in Virtual and Augmented Environments (ANIVAE)*, p. 1-6.
- WALTER, R. (1973). « Problems in Determining Rest Allowances ». In : *Applied Ergonomics*. T. 4, p. 91-95.
- WANG, L.-C. et C. CHEN (1991). « A Combined Optimization Method for Solving the Inverse Kinematics Problems of Mechanical Manipulators ». In : *IEEE Transactions on Robotics and Automation* 7.4, p. 489-499.
- WANG, M.-J. J., E. M.-y. WANG et Y.-C. LIN (2002). « The Anthropometric Database for Children and Young Adults in Taiwan ». In : *Applied Ergonomics* 33.6, p. 583-585.
- WANG, T., Y. GUO, M. SHUGRINA et S. FIDLER (2020). « UniCon : Universal Neural Controller for Physics-Based Character Motion ». In : *arXiv preprint*.
- WARE, C. et G. FRANCK (1994). « Viewing a Graph in a Virtual Reality Display Is Three Times as Good as a 2D Diagram ». In : *Proceedings of 1994 IEEE Symposium on Visual Languages*, p. 182-183.
- WATERMAN, D. et C. T. WASHBURN (1978). « CYBERMAN - A Human Factors Design Tool ». In : *SAE Transactions* 87.2, p. 1295-1306.
- WATERS, T. R., VERN PUTZ-ANDERSON et ARUN GARG (1994). *Applications Manual for the Revised NIOSH Lifting Equation*. National Institute for Occupational Safety and Health.
- WEI, T., S. WANG, J. ZHONG, D. LIU et J. ZHANG (2022). « A Review on Evolutionary Multitask Optimization : Trends and Challenges ». In : *IEEE Transactions on Evolutionary Computation* 26.5, p. 941-960.
- WEISELL, R. C. (2002). « Body Mass Index as an Indicator of Obesity : Body Mass Index as an Indicator of Obesity ». In : *Asia Pacific Journal of Clinical Nutrition* 11.8, p. 681-684.
- WEISTROFFER, V., F. KEITH, A. BISIAUX, C. ANDRIOT et A. LASNIER (2022). « Using Physics-Based Digital Twins and Extended Reality for the Safety and Ergonomics Evaluation of Cobotic Workstations ». In : *Frontiers in Virtual Reality* 3.
- WIEHAGEN, W. J. et F. C. TURIN (2004). *Ergonomic Assessment of Musculoskeletal Risk Factors at Four Mine Sites : Underground Coal, Surface Copper, Surface Phosphate, and Underground Limestone*. National Institute for Occupational Safety and Health.
- WILSON, J. R. (2000). « Fundamentals of Ergonomics in Theory and Practice ». In : *Applied Ergonomics* 31.6, p. 557-567.
- WIRSCHING, H.-J. (2019). « Human Solutions RAMSIS ». In : *DHM and Posturography*. Academic Press, p. 49-55.
- WON, J., D. GOPINATH et J. HODGINS (2022). « Physics-Based Character Controllers Using Conditional VAEs ». In : *ACM Transactions on Graphics* 41.4, p. 1-12.
- XU, X., G. A. MIRKA et S. M. HSIANG (2008). « The Effects of Obesity on Lifting Performance ». In : *Applied Ergonomics* 39.1, p. 93-98.

- YAZDANI, A., R. S. NOVIN, A. MERRYWEATHER et T. HERMANS (2022). « DULA and DEBA : Differentiable Ergonomic Risk Models for Postural Assessment and Optimization in Ergonomically Intelligent pHRI ». In : *2022 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, p. 9124-9131.
- YONEI, Y., Y. MIWA, S. HIBINO, Y. TAKAHASHI, R. MIYAZAKI, T. YOSHIKAWA, H. MORIWAKI, T. HASEGAWA, T. HIRAISHI et K. TORII (2008). « Japanese Anthropometric Reference Data - Special Emphasis on Bioelectrical Impedance Analysis of Muscle Mass ». In : *Anti-aging Medicine* 5, p. 63-72.
- ZATSIORSKY, V. et V. SELUYANOV (1979). « Mass-Inertial Characteristics of the Segments of the Human Body and Their Relationship with Anthropometric Landmarks ». In : *Voprosy Antropologii* 62, p. 91-103.
- ZIEGLER, J. G. et N. B. NICHOLS (1942). « Optimum Settings for Automatic Controllers ». In : *Transactions of the American Society of Mechanical Engineers* 64.8, p. 759-765.

## Annexe A

# Limites en couples articulaires dans la littérature

### A.1 Population moyenne

Pour animer l'humain virtuel en simulation physique, le modèle de l'humain et le contrôleur corps-complet doivent utiliser des valeurs réalistes pour les limites en couple articulaire. Les travaux de thèse se basent sur des valeurs de capacité en couple articulaire pour un individu moyen et issues de la littérature en biomécanique.

Articulation de l'humain virtuel	Couple maximal (N.m) par degré de liberté			Référence
	X	Y	Z	
Lombaire	155	228	65	CHAFFIN et al. (2006)
Thorax	155	228	65	HOLZBAUR et al. (2005)
Clavicule	107	-	105	
Épaule	90	90	51	
Coude	75	-	13	
Main	10	11	13	
Hanche	108	186	67	
Genou	-	164	22	
Cheville	29	123	-	
Orteil	-	14,2	-	GOLDMANN et al. (2012)
Cou	20	20	20	LECOMPTE et al. (2007)
Tête	20	20	20	

TABLE A.1 – Valeurs des capacités en couples articulaires pour un humain virtuel de morphologie moyenne (1,75 m, IMC 24).

Le [tableau A.1](#) donne les valeurs de capacités maximales en couple articulaire, provenant de plusieurs études différentes. En pratique, différents groupes musculaires sont sollicités selon la direction du mouvement (flexion/extension, adduction/abduction, etc.) ce qui implique des capacités en couples différentes. Pour simplifier, la valeur limite la plus élevée est retenue pour chaque degré de liberté. Enfin, par rapport aux études biomécaniques citées, le mo-



dèle d'humain virtuel présente une décomposition plus précise des articulations pour le dos (*Lumbar* et *Thoracic*) et le cou (*Neck* et *Head*). Dans ce cas, les mêmes valeurs limites sont utilisées.

## A.2 Populations obèses et non-obèses

Dans le [chapitre 5](#), ces limites en couples sont recalculées en fonction de la taille et de l'IMC, en basant sur des études comparatives sur les capacités en forces musculaires entre des populations obèses et non obèses.

Groupe musculaire	IMC	$F_{\max}$	Articulation(s) sur l'humain virtuel	Référence
Épaule (flexeur)	22,9	50	Clavicule, épaule, coude, main	CAVUOTO et al. (2019)
	35,1	62		
Torse (flexeur)	22	79	-	
	37,8	101,7		
Torse (extenseur)	22	174,5	Lombaire, thorax	HULENS et al. (2001)
	37,8	193,1		
Torse (rotateur)	22	74,5	Lombaire, thorax	
	37,8	79,4		
Jambes ( <i>leg press</i> )	22	1788	Hanche, genou, cheville, orteil	LAFORTUNA et al. (2005)
	41,1	2191		
Genou (flexeur)	22	72,5	-	
	37,8	68,4		
Genou (extenseur)	22	123,6	Genou	HULENS et al. (2001)
	37,8	137,9		

TABLE A.2 – Comparatif des forces musculaires maximales  $F_{\max}$  entre populations non-obèse et obèse, pour différents groupes musculaires.

Le [tableau A.2](#) donne les valeurs utilisées pour recalculer les limites en couples articulaires en fonction de l'IMC et la taille et dont la méthode est présentée dans la [sous-sous-section 5.3.2.3](#). Il n'existe pas à ce jour d'étude comparative synthétique sur l'ensemble du corps : plusieurs études ont dû être combinées, avec des mesures sur un nombre limité d'articulations. Pour combler les données manquantes, certaines données sont réutilisées pour les articulations appartenant au même groupe fonctionnel (par exemple, les données de l'épaule sur l'ensemble du bras). En effet, dans la méthode proposée, ce sont les différences relatives qui nous intéressent et non pas les valeurs absolues. Pour la main, l'effet de l'IMC est négligeable (CAVUOTO et al., 2019) : les limites en couples ne sont donc pas recalculées. Pour la tête, on considère que l'augmentation des capacités musculaires est proportionnelle à l'augmentation de la masse de la tête.