

Contrôle de mouvement pour la simulation d'humains virtuels anatomiques

Nicolas PRONOST

Soutenance d'Habilitation à Diriger des Recherches

Plan de la soutenance

- ◇ Parcours de recherche
- ◇ Présentation des principes fondamentaux et des défis
- ◇ Résumé de travaux de recherche
- ◇ Conclusion et perspectives de recherche

Plan de la soutenance

- ◆ Parcours de recherche
- ◆ Présentation des principes fondamentaux et des défis
- ◆ Résumé de travaux de recherche
- ◆ Conclusion et perspectives de recherche

Parcours de recherche

Postdoc

Université de Hangzhou
State Key Lab of CAD&CG

Postdoc

EPFL
VRLab

Assistant Professor

Université d'Utrecht
Virtual Human Technology Lab

Maître de Conférences

Université Claude Bernard Lyon I
LIRIS - SAARA

2007



2008



2010



2014



Equipe associée INRIA : BIRD

Projet européen : 3DAH

Projets nationaux : GATE, COMMIT

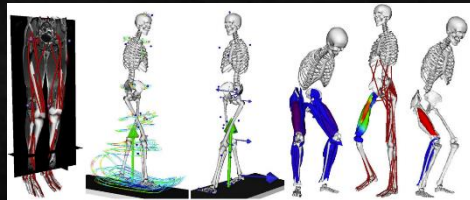
Co-encadrement de deux thèses

Projet international : OMEGA

Co-encadrement de trois thèses



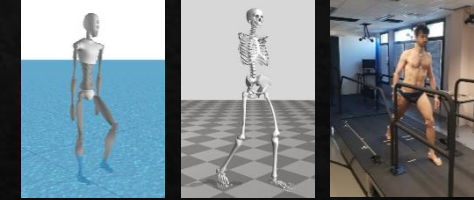
- Contrôle de mouvement cinématique



- Modélisation et simulation musculosquelettique



- Animation interactive basée physique
- Simulation de mouvements à risque



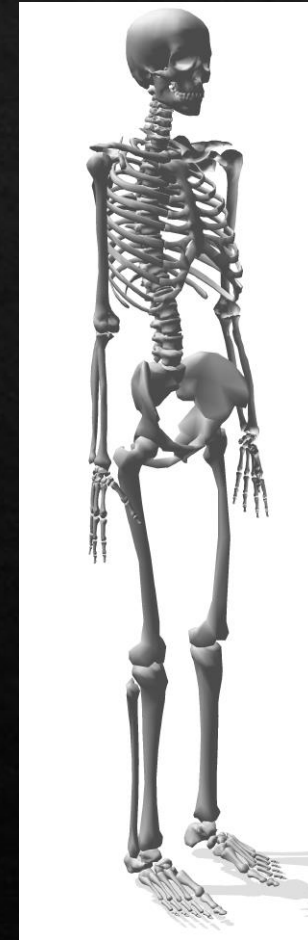
- Animation interactive basée physique
- Simulation prédictive de mouvements

Plan de la soutenance

- ◇ Parcours de recherche
- ◇ Présentation des principes fondamentaux et des défis
- ◇ Résumé de travaux de recherche
- ◇ Conclusion et perspectives de recherche

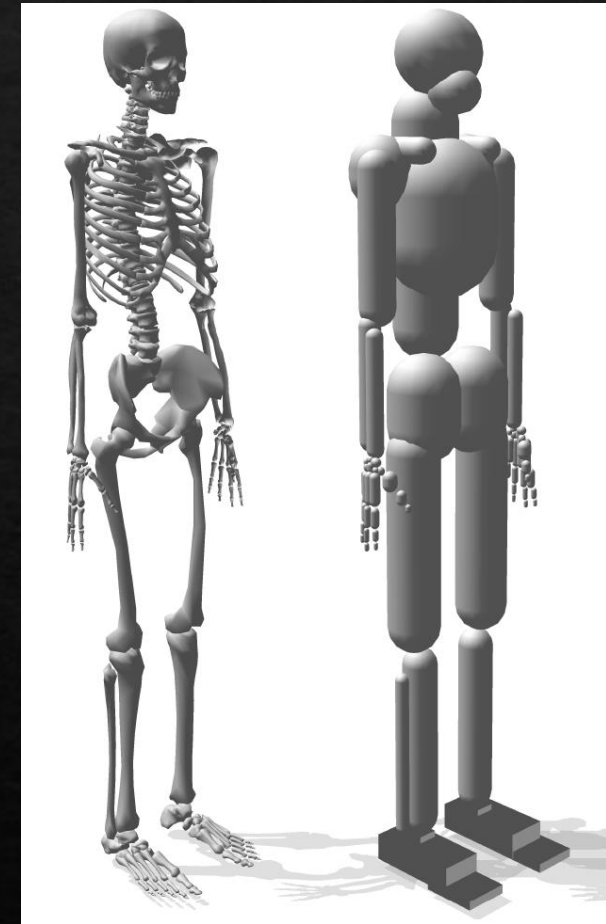
Les humains virtuels anatomiques

- ◇ Modèle articulaire et principe cinématique
 - ◇ 206 os et 360 articulations dans le corps humain
 - ◇ rassemblement des os et simplification des articulations
 - ◇ corps rigides articulés
 - ◇ entre 7 et 20 corps rigides et 1 à 3 degrés de liberté de rotation par articulation
 - ◇ Chaque degré de liberté peut être spécifié et permet de décrire une pose



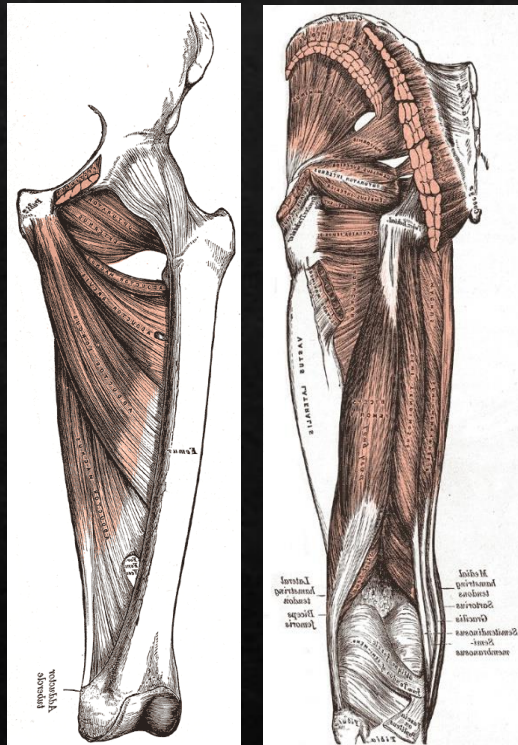
Les humains virtuels anatomiques

- ◇ Modèle physique et principe dynamique
 - ◇ Géométries de collisions
 - ◇ Souvent des primitives (cylindre, capsule, boîte)
 - ◇ Détection/résolution des collisions plus rapide
 - ◇ Parfois combinaisons (boîte + cylindre pour pied)
 - ◇ Masses et inerties des corps rigides
 - ◇ Souvent automatiquement calculées depuis la géométrie de collision et la densité
 - ◇ Le mouvement est issu d'un calcul
 - ◇ Lois du mouvement et simulation physique
 - ◇ Moments articulaires, forces externes et forces virtuelles

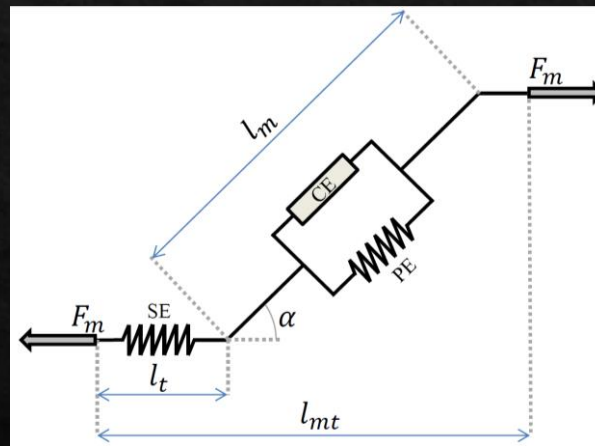


Les humains virtuels anatomiques

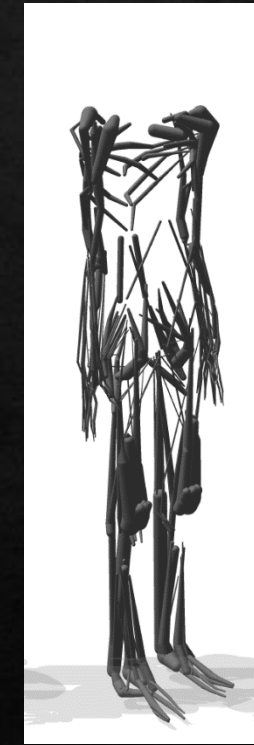
- ◇ Modèle musculosquelettique et principe neuromusculaire



[Gray 1918]

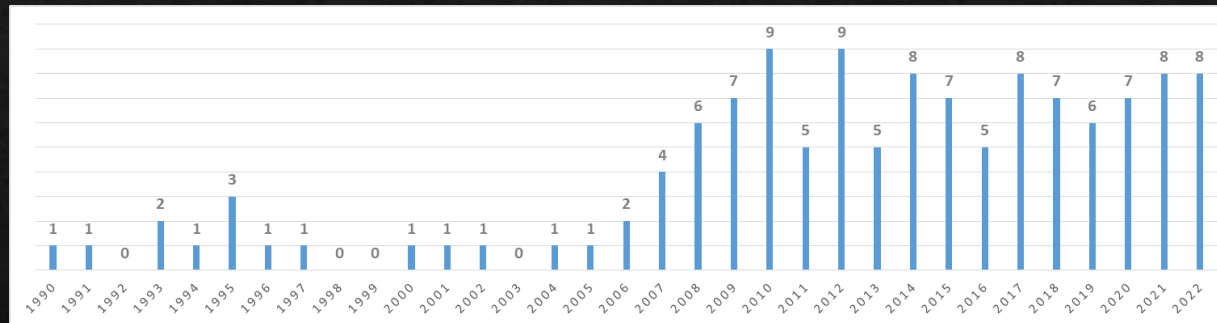


MTU [Zajac 1989]



Simulation basée physique

- ◇ Les simulateurs de l'état de l'art permettent de contrôler activement des systèmes complexes tels que des humains virtuels
 - ◇ Amélioration de la robustesse, la qualité visuelle, l'utilisabilité et la performance



nombre de publications
SIGGRAPH et Eurographics



[Hodgins et al. 1996]



[Peng et al. 2022]

Simulation basée physique

- ◇ Le mouvement est le résultat d'un calcul
- ◇ Avantages
 - ◇ Possibilité de générer des mouvements sans donnée d'entrée
 - ◇ Les objets et les humains virtuels interagissent de manière physiquement réaliste
- ◇ Inconvénient majeur : plus difficile à contrôler que cinématiquement
 - ◇ Requier des forces et des moments
 - ◇ Pas de contrôle global direct
 - ◇ Nécessite des composants pour gérer le mouvement, l'équilibre, les interactions etc.

Contrôleur de mouvement

- ◇ Contrôle de mouvement dans l'espace des articulations
 - ◇ Objectif : suivre une consigne cinématique par rétroaction locale
 - ◇ Utilisation de régulateurs PD et de mouvements de référence
- ◇ Contrôle par un réseau de réponse à stimulus
 - ◇ Objectif : s'inspirer des systèmes biologiques pour faire évoluer le contrôleur
 - ◇ Utilisation de l'apprentissage, des réseaux de neurones
- ◇ Contrôle par optimisation en dynamique contrainte
 - ◇ Objectif : calculer un mouvement optimal
 - ◇ Utilisation de stratégies d'optimisation de paramètres et de fonctions de coût

Contrôleur de mouvement

	Rétroaction	Apprentissage	Optimisation
Maturité	+	-	+
Qualité des résultats	-	+	+
Généricité et interactivité	+	-	-

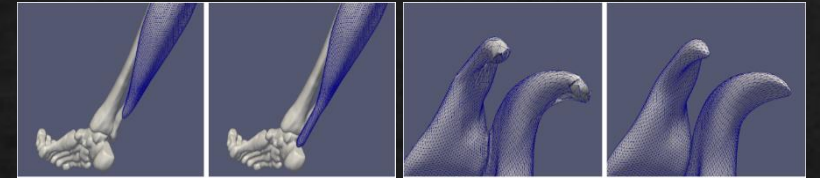
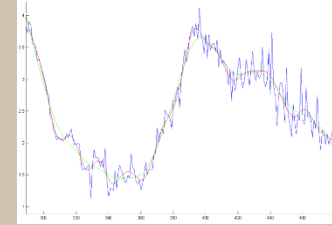
Plan de la soutenance

- ◇ Parcours de recherche
- ◇ Présentation des principes fondamentaux et des défis
- ◇ **Résumé de travaux de recherche**
- ◇ Conclusion et perspectives de recherche

Nos principales contributions

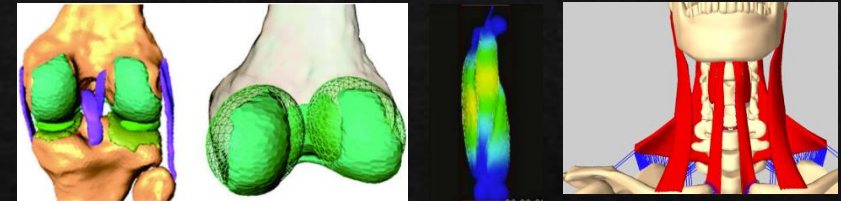
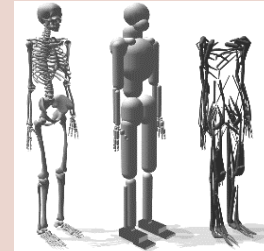
Données spécifiques (mocap, IRM, ...)

Traitement



Données génériques

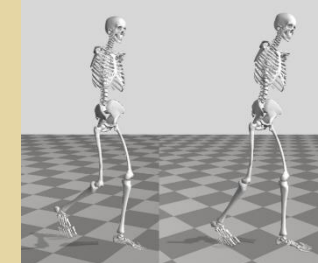
Modélisation
spécifique



Simulations
interactives



Simulations
prédictives



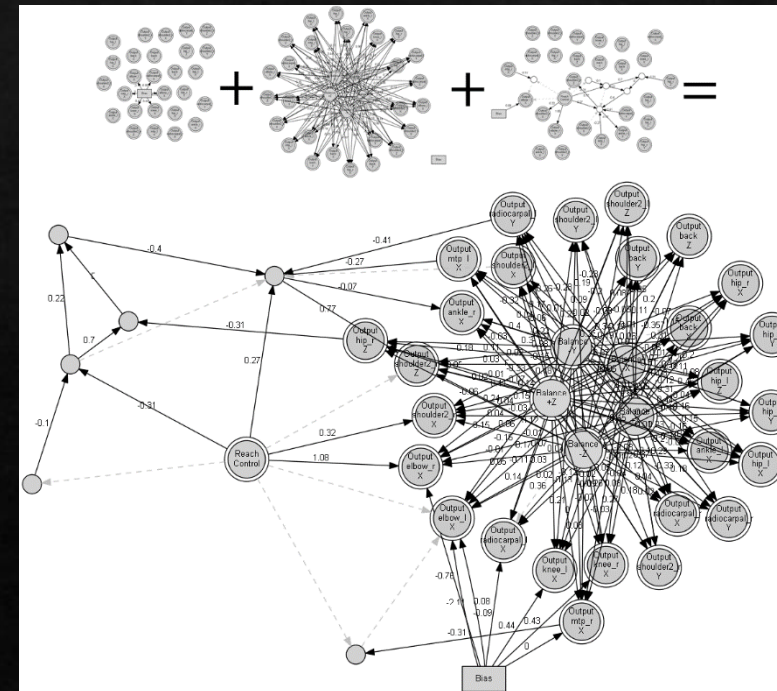
Approche génétique pour le contrôle

- ◇ Réseau de neurones artificiel créé par un procédé d'évolution [Hagenaars et al. 2014]
- ◇ Conception hiérarchique et modulaire
 - ◇ Evolution pas-à-pas depuis des objectifs bas niveau (manipulation d'un degré de liberté)
 - ◇ Vers des objectifs haut niveau (mouvement coordonné de plusieurs degrés de liberté)

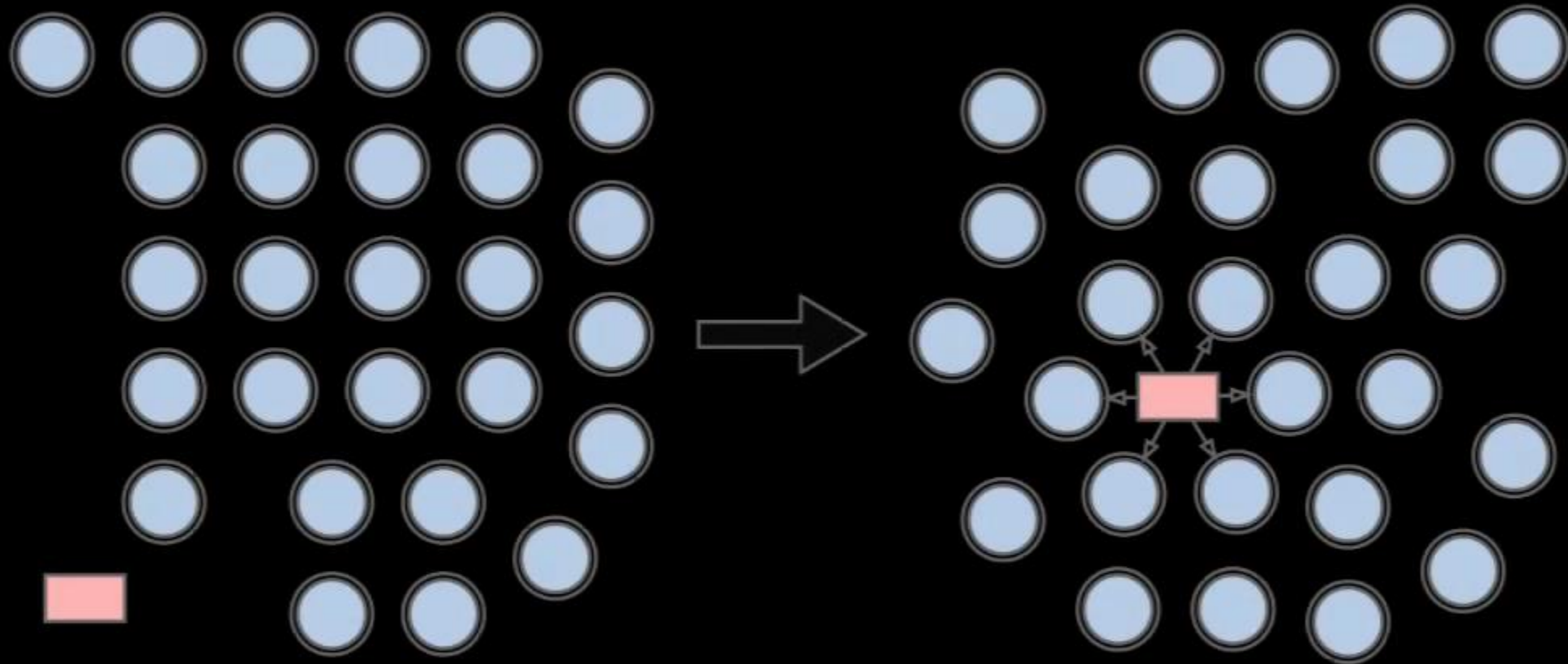
Approche génétique pour le contrôle

- ◇ Réseau de neurones artificiel créé par un procédé d'évolution [Hagenaars et al. 2014]
- ◇ Conception hiérarchique et modulaire
 - ◇ Evolution pas-à-pas depuis des objectifs bas niveau (manipulation d'un degré de liberté)
 - ◇ Vers des objectifs haut niveau (mouvement coordonné de plusieurs degrés de liberté)

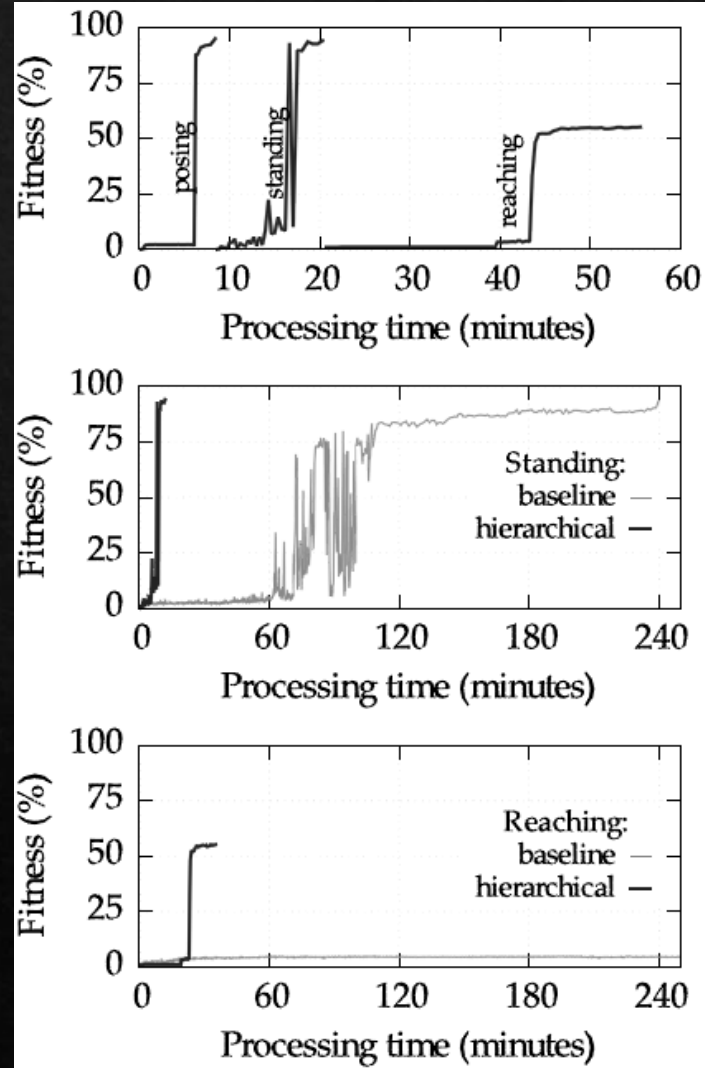
- ◇ Réseaux pour tenir une pose, se tenir debout, et attraper



Evolution of "posing" control module.

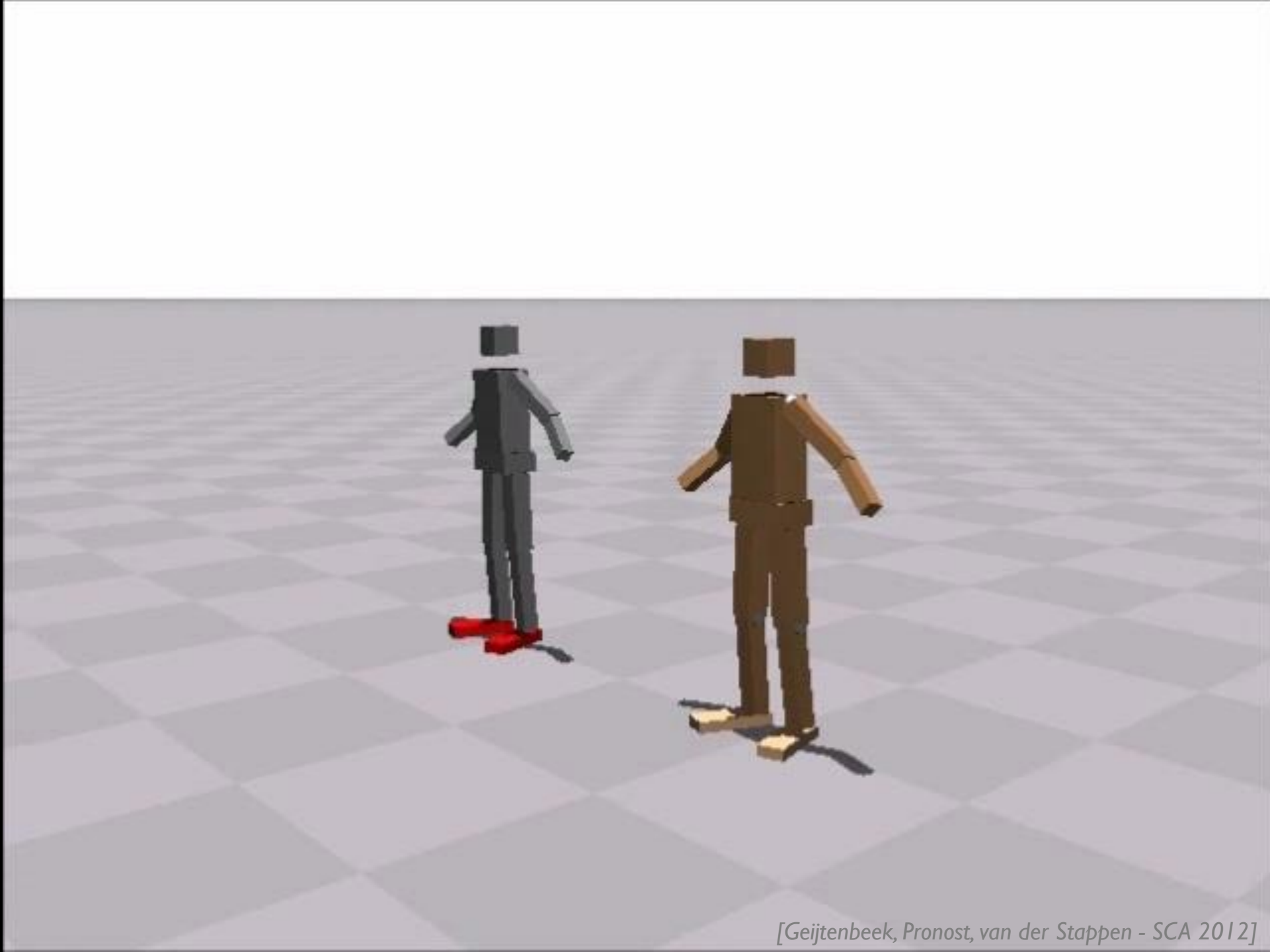


Approche génétique pour le contrôle



Contrôle direct articulaire

- ◇ Contrôle basé données pour bipèdes [Geijtenbeek et al. 2012]
 - ◇ Objectifs (contraintes)
 - ◇ Pas de prétraitement des mouvements de référence
 - ◇ Pas de donnée issue de la dynamique inverse
 - ◇ Pas d'optimisation en ligne
 - ◇ Méthode
 - ◇ Suivi individuel des degrés de liberté par régulateurs PD
 - ◇ Contrôle par transposée de Jacobienne pour l'équilibre
 - ◇ Gestion de la position et vitesse du CdM, l'orientation et le moment angulaire du tronc
 - ◇ Application de forces et couples virtuels sur les membres inférieurs
 - ◇ Optimisation hors ligne spécifique aux mouvements et aux bipèdes
 - ◇ Paramètres optimisés : gains des régulateurs PD, poids des composants gérant l'équilibre
 - ◇ Fonction de coût : erreur de pose, erreur d'appui, glissement des pieds, couple total



[Geijtenbeek, Pronost, van der Stappen - SCA 2012]

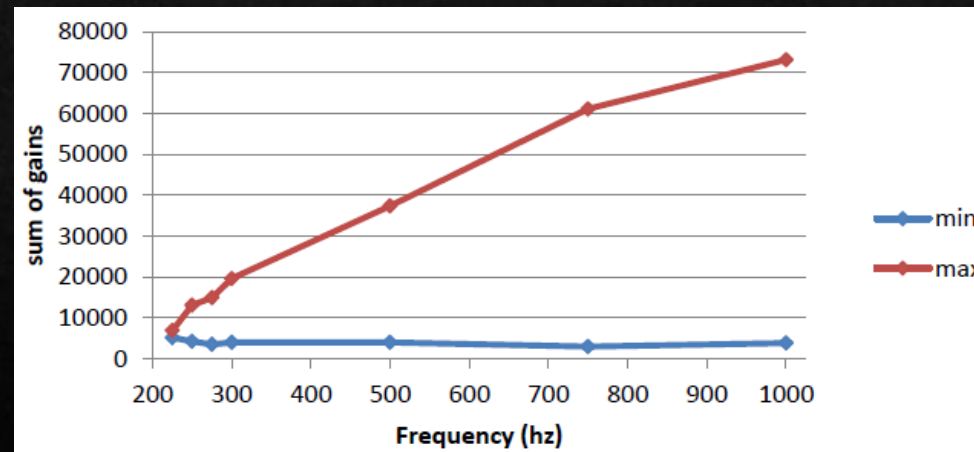
Contrôle de marche pour bipède immergé

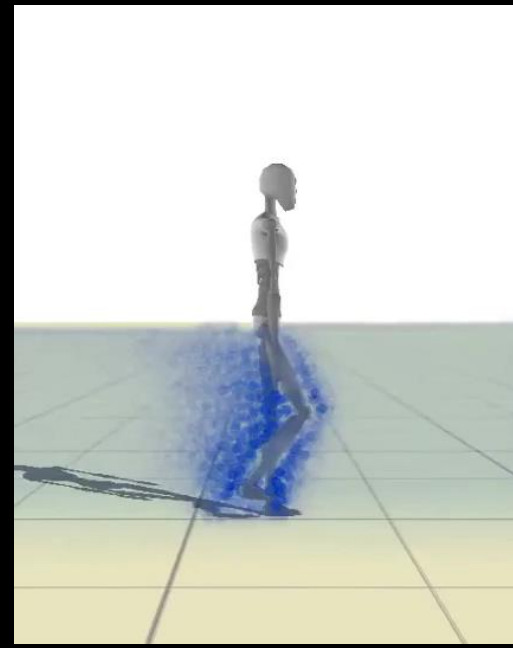
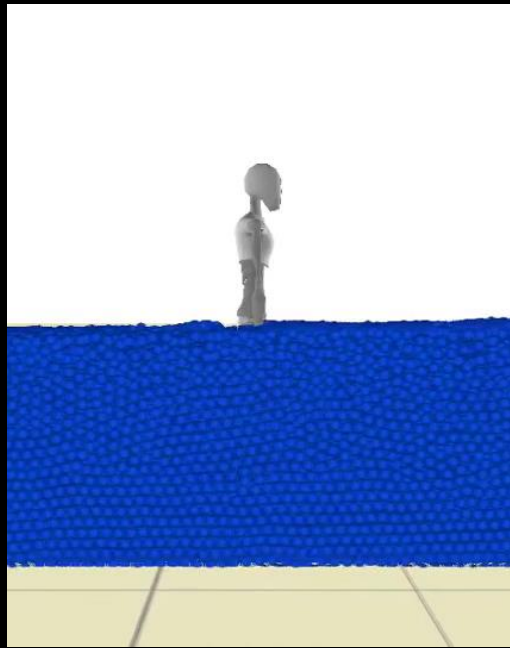
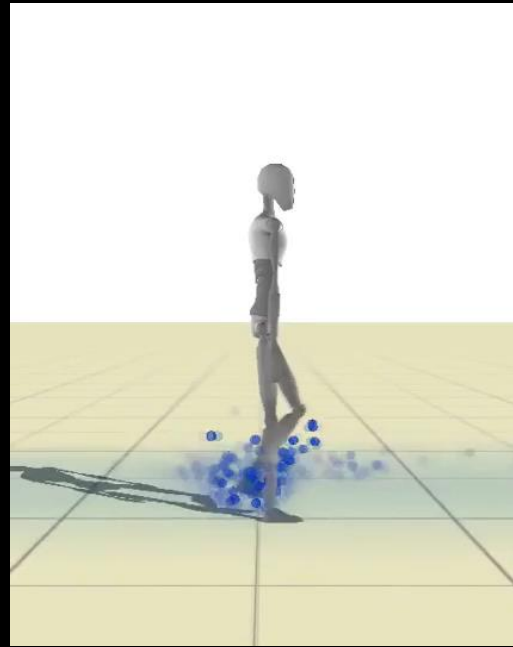
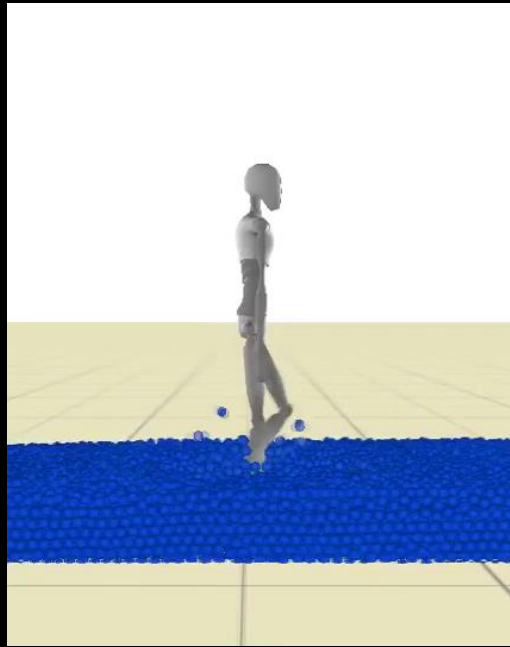
- ◇ Objectif : développer une méthode rapide et interactive de contrôle de marche pour des bipèdes immergés dans un volume de liquide [Carensac et al. 2015, 2018]
 - ◇ Hydrodynamique simple : résistance du fluide et poussée d'Archimède
 - ◇ Optimisation hors ligne du mouvement de référence : énergie consommée, résistance, accélération angulaire
 - ◇ Adaptation temps-réel du mouvement de référence : combinaison de mouvements
 - ◇ Suivi précis de la vitesse de marche : stratégie d'apprentissage et pendule inversé

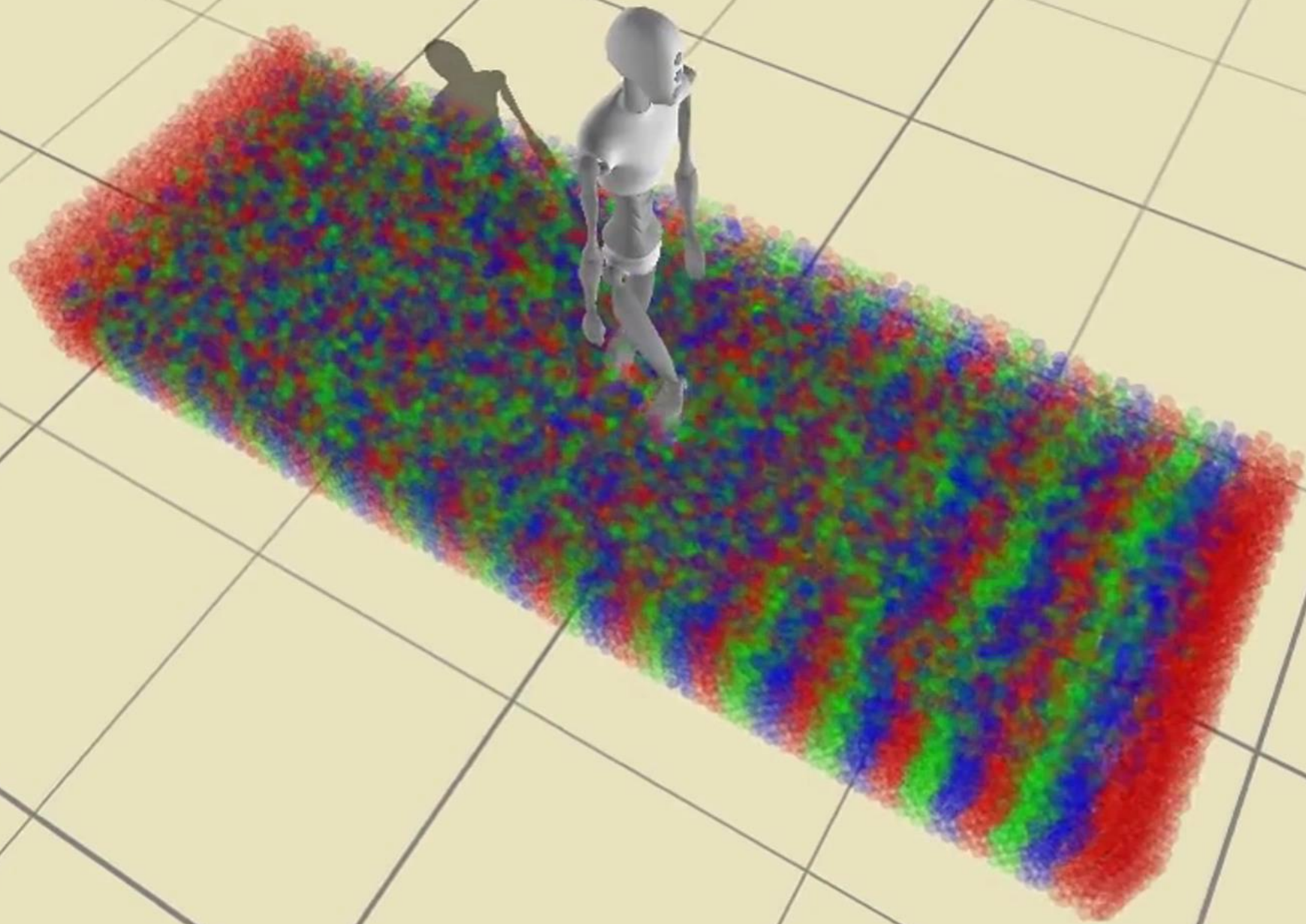
Real-time gait control for partially immersed bipeds

Simulation basse fréquence

- ◇ Le principe d'hydrodynamique simple n'inclut pas d'interaction duale
- ◇ Nécessite une simulation de fluide coûteuse en temps de calcul
- ◇ Investigation du contrôle basse fréquence pour libérer du temps de calcul
 - ◇ Un processus de stabilisation des contacts pied/sol par optimisation en ligne
 - ◇ Les gains des régulateurs PD dépendant de la fréquence







Simulations prédictives

◆ Objectifs

- ◆ Estimation de la condition interne d'un patient
- ◆ Prédiction de mouvement après évolution naturelle ou pathologique, une thérapie ou chirurgie

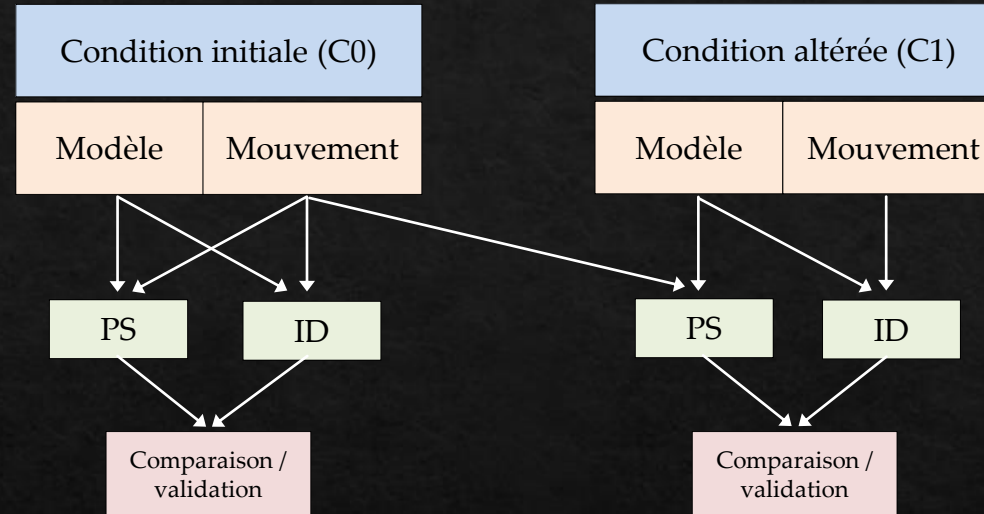
◆ Verrous

- ◆ Modélisation spécifique des patients et leurs pathologies
- ◆ Conception d'un simulateur prédictif
 - ◆ Problème de contrôlabilité, de précision et de stabilité

◆ Projets de recherche

- ◆ Marches avec réduction de flexion du genou et pathologie du pied tombant
- ◆ Tâches d'accessibilité comme la montée et descente d'un tapis roulant

Le projet OMEGA



- ◇ Réduction de flexion : C0 = sans port d'orthèse et C1 = avec port d'orthèse
- ◇ Pathologie du pied tombant : C0 = initiale pathologique et C1 = avec stimulateur électrique
- ◇ Deux approches pour la prédiction : contrôle optimal et apprentissage

Approche par contrôle optimal

- ◇ En utilisant la méthode de [Falisse et al., 2019]

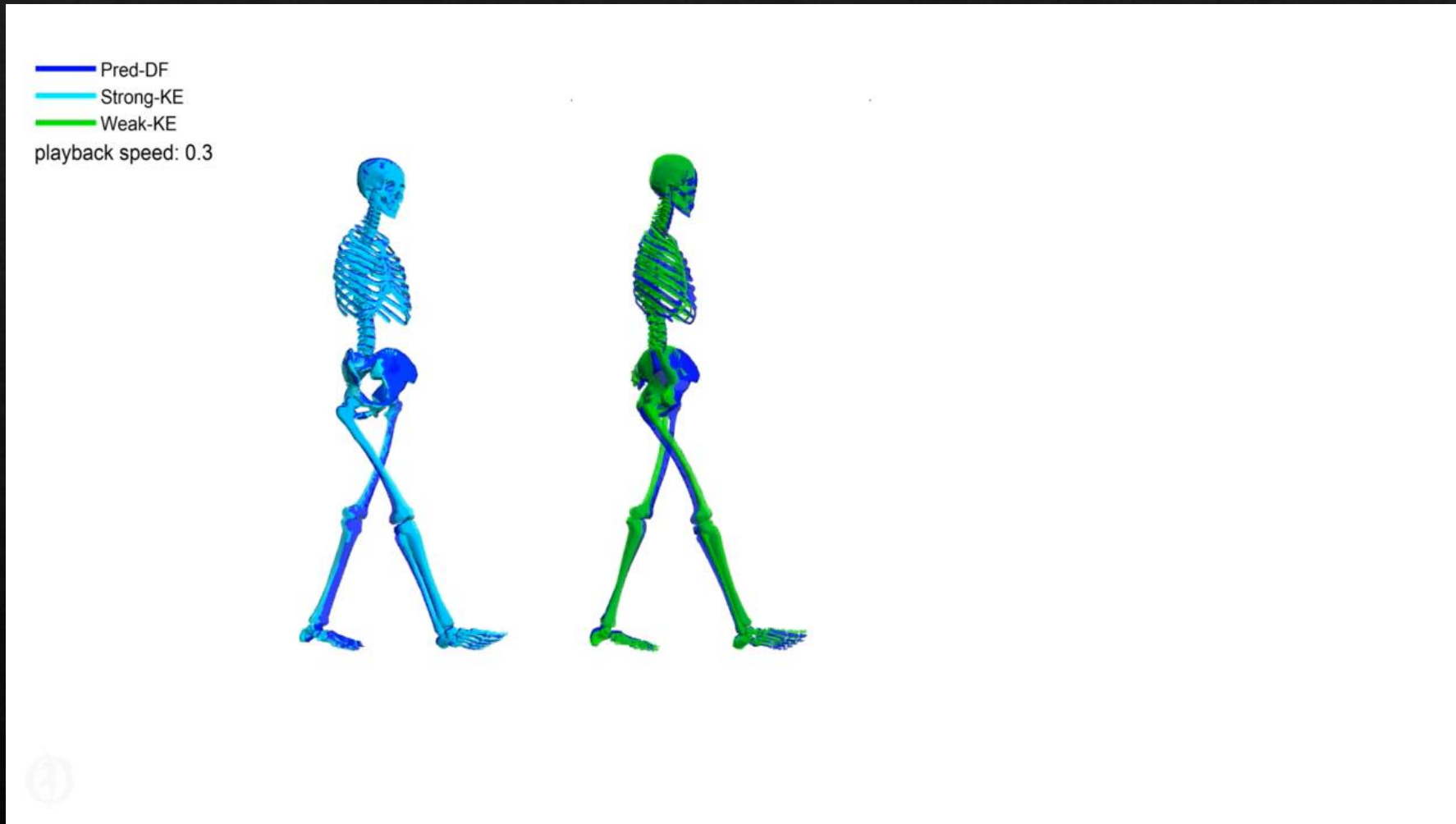
- ◇ Fonction de coût

$$\int_{t_i}^{t_f} \sum \left(W_1 a^2 + W_2 \dot{E} + W_3 q^2 + W_4 (\dot{a}^2 + Fm^2) \right) \frac{1}{Dist} dt$$

- ◇ La plupart des résultats attendus

- ◇ Marche plus lente avec orthèse, amplitude limitée, diminution de la flexion de hanche, des moments articulaires de la hanche, des forces de réaction antéro-postérieures
- ◇ Marche plus rapide avec stimulation électrique, augmentation de la dorsiflexion de la cheville
- ◇ Signaux d'activation musculaire réalistes

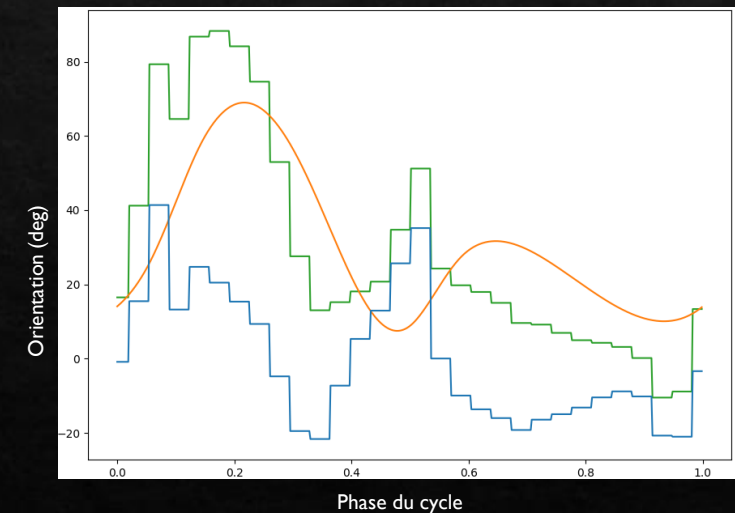
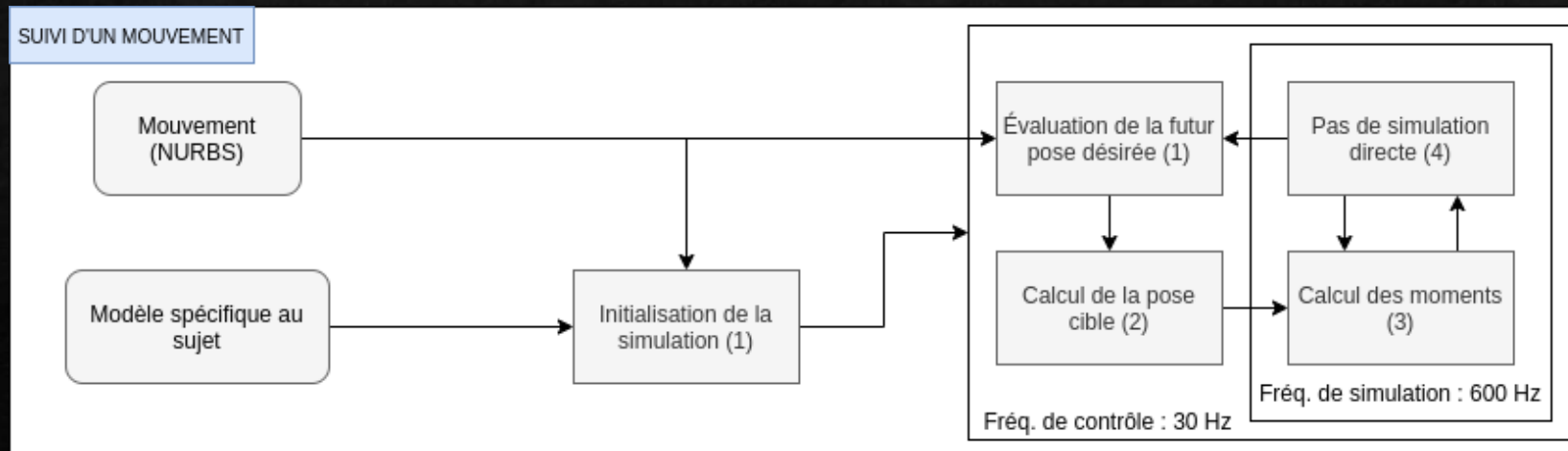
Approche par contrôle optimal



[Santos, Jakubowitz, Pronost, Bonis, Hurschler - ISB 2021]

Approche par apprentissage

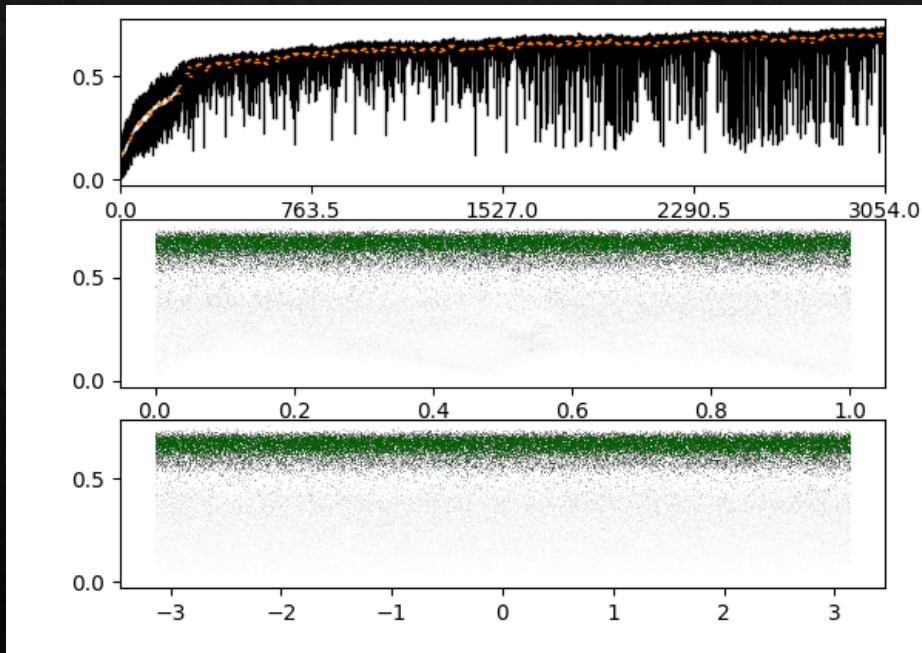
- ◇ Entraînement d'un réseau de neurones pour suivre un mouvement de référence (C0)
 - ◇ Entrées : positions relatives et vitesses des CdM des corps rigides, phase
 - ◇ Sorties : décalages d'angles à appliquer sur le mouvement de référence ensuite utilisés par des régulateurs PD aux articulations
- ◇ Robustesse suffisante pour produire des variations du mouvement de référence



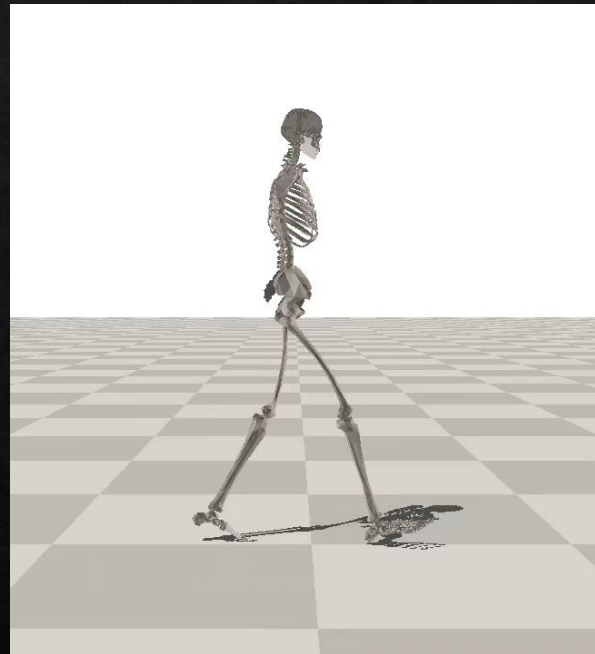
Approche par apprentissage

◇ Exemples d'entraînement

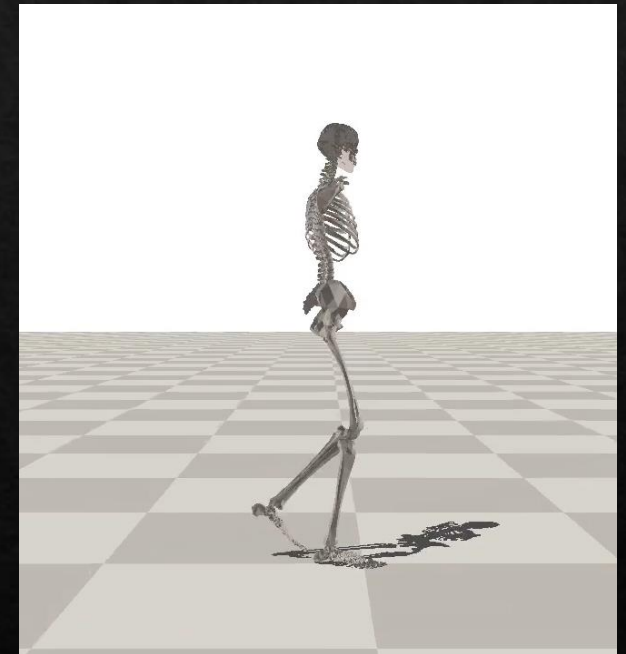
◇ 22 M de transitions, durée 33 ms, 200h de mouvement simulé, 10h d'entraînement du réseau



Évolution de la fonction de coût, récompense en fonction de la direction et de la phase d'initiale



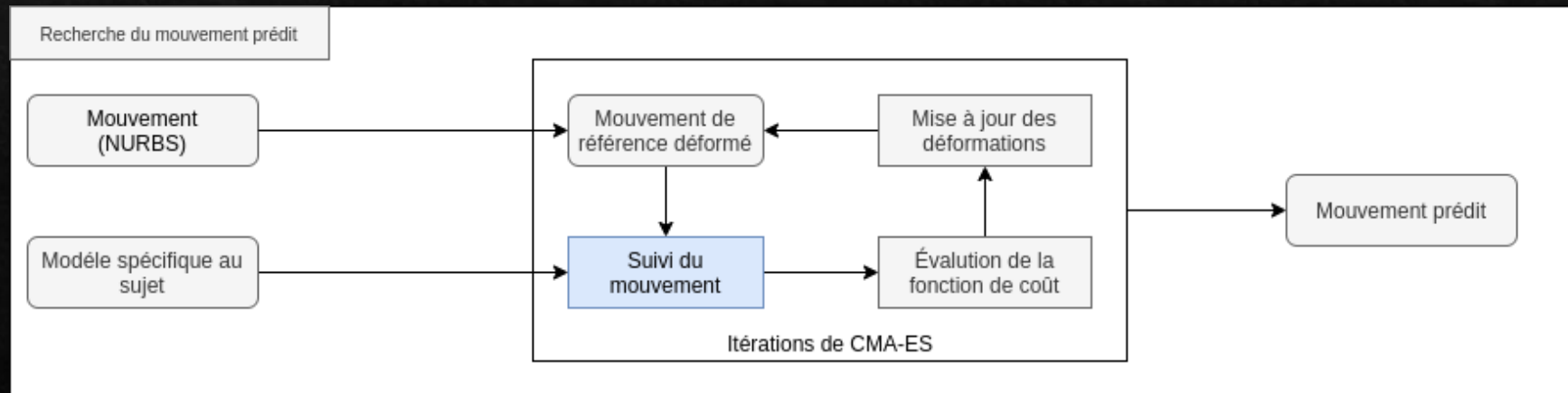
Mouvement sain (C0)



Mouvement pathologique (C1)

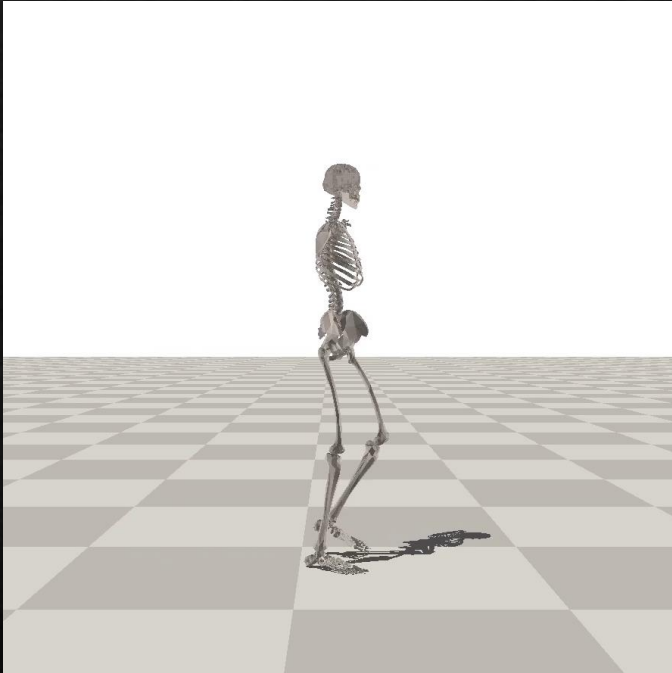
Approche par apprentissage

- ◇ Optimisation du mouvement de référence
- ◇ Fonction de coût : respect de la contrainte pathologique, collision entre les jambes, direction de la marche et stabilité du mouvement
- ◇ L'espace de recherche est réduit grâce à
 - ◇ la représentation du mouvement par courbes paramétriques avec un peu de points de contrôle
 - ◇ la sélection des trajectoires articulaires les plus impliquées dans la pathologie étudiée

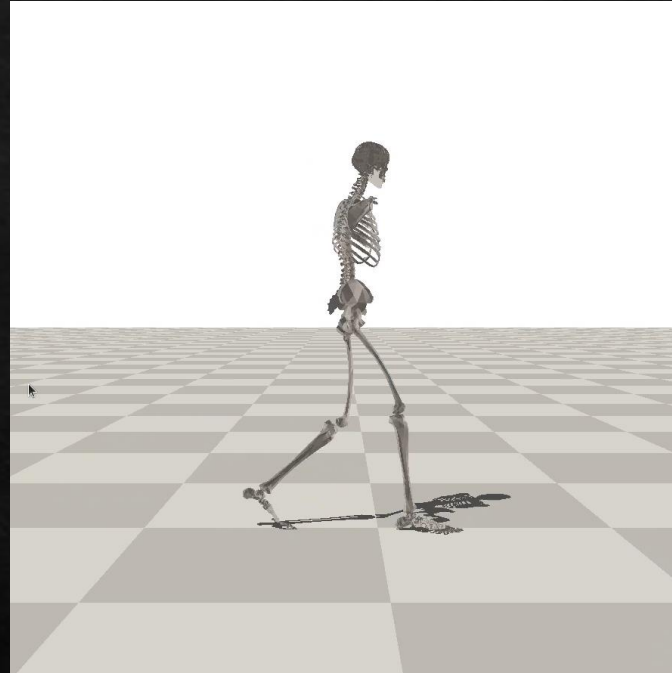


Approche par apprentissage

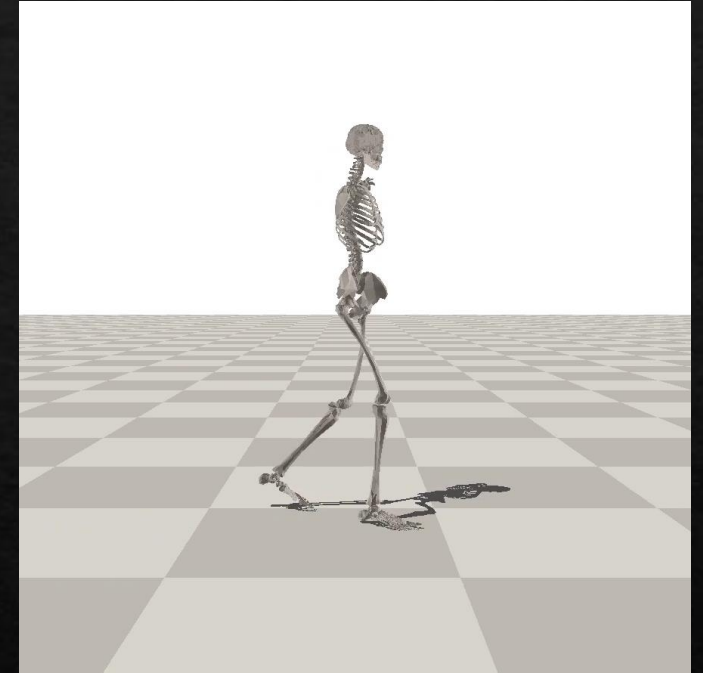
◇ Prédictions réalisées



- *Minimisation de la moyenne des moments*
- *Espace de recherche peu réduit*



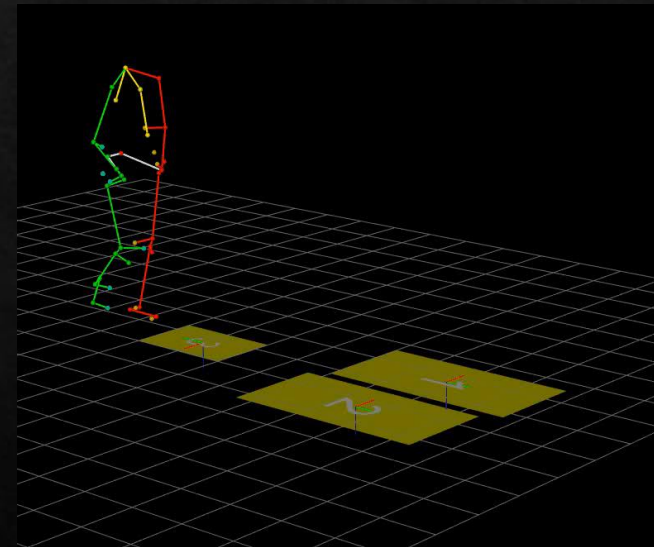
- *Optimisation de la flexion*
- *Espace de recherche peu réduit*



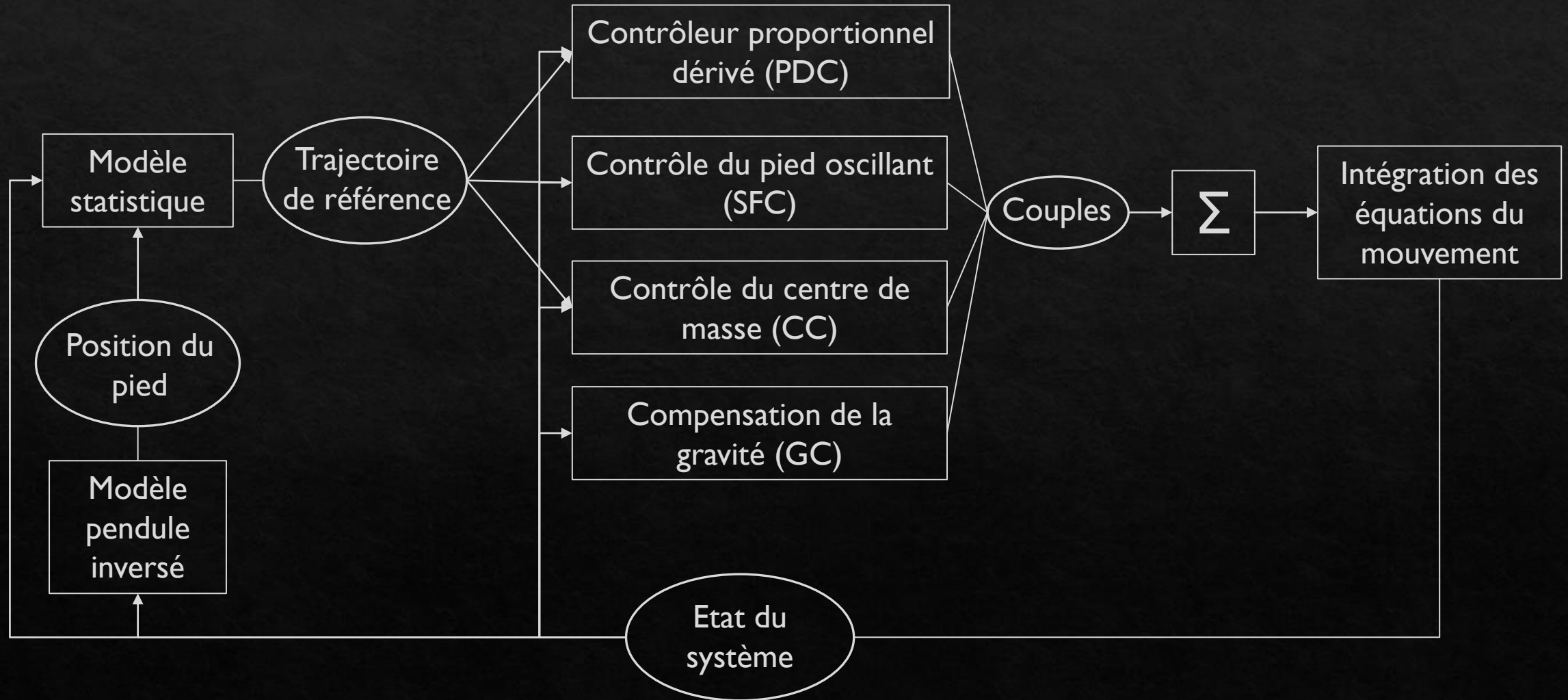
- *Minimisation moments et optimisation flexion*
- *Espace de recherche réduit*

Simulateur de mouvement pour l'accessibilité

- ◇ Enjeu de la perte de mobilité, en particulier chez les personnes à mobilité réduite
- ◇ La simulation en tant qu'outil de prototypage et en complément à des expérimentations
- ◇ Expérimentation sur la marche et le passage d'obstacle (lacune et tapis roulant)

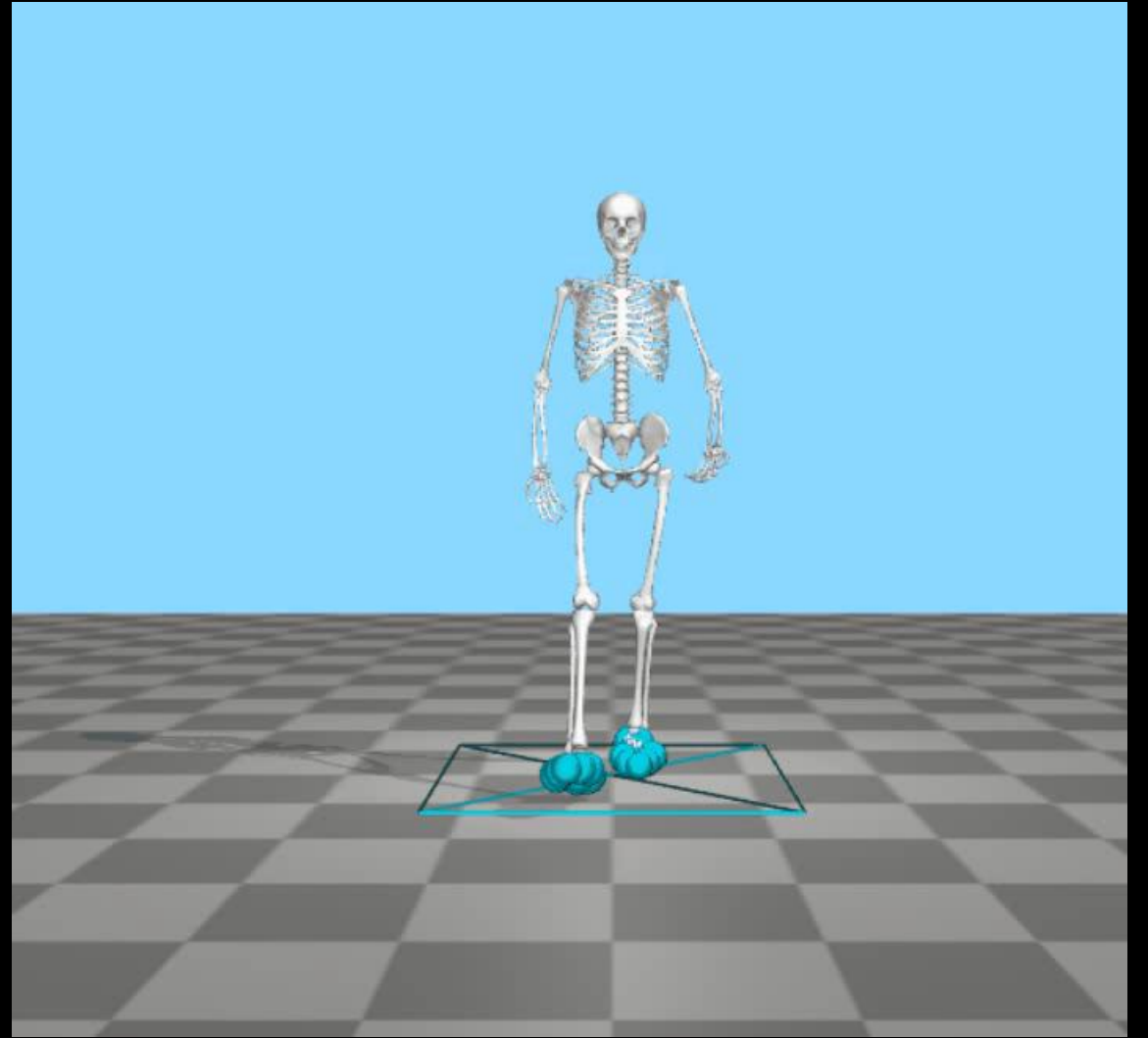
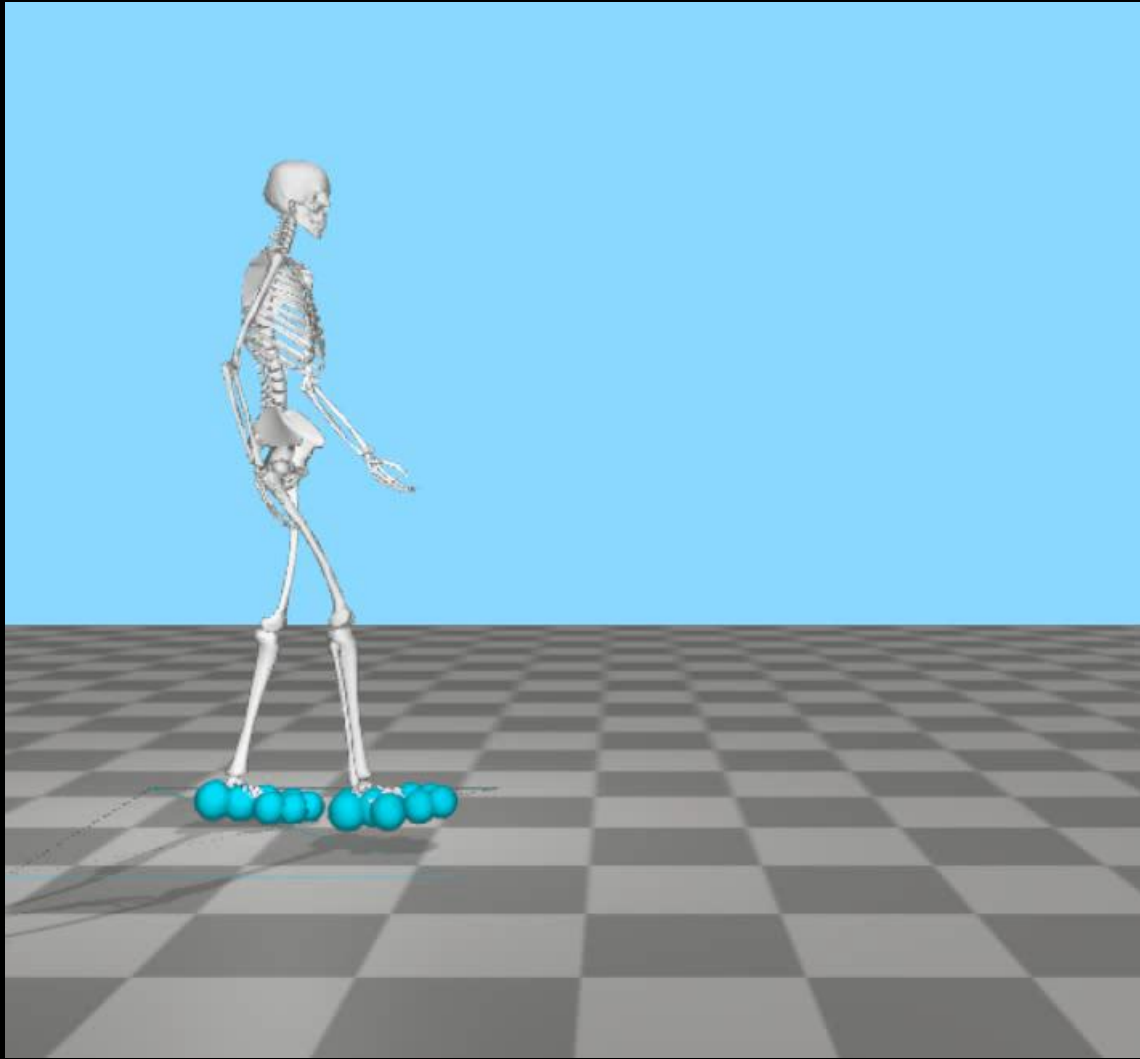


Simulateur de mouvement pour l'accessibilité



Simulateur de mouvement pour l'accessibilité

		Premier double appui	Simple appui	Second double appui	Phase oscillante
Flexion-extension de hanche	PDC	Blue hatched	Blue hatched	Blue hatched	Blue hatched
	SFC	White	Yellow	White	Yellow
	CC	Red hatched	Red hatched	Red hatched	Red hatched
	GC	White	White	White	Green hatched
Adduction-abduction de hanche	PDC	Blue hatched	Blue hatched	Blue hatched	Blue hatched
	SFC	White	Yellow	White	Yellow
	CC	Red hatched	Red hatched	Red hatched	Red hatched
	GC	White	White	White	Green hatched
Rotation interne-externe de hanche	PDC	Blue hatched	Blue hatched	Blue hatched	Blue hatched
	SFC	White	Yellow	White	White
	CC	Red hatched	Red hatched	Red hatched	Red hatched
	GC	White	White	White	Green hatched
Flexion-extension de genou	PDC	Blue hatched	Blue hatched	Blue hatched	Blue hatched
	SFC	White	White	White	Yellow
	CC	Red hatched	Red hatched	Red hatched	Red hatched
	GC	White	White	White	Green hatched
Dorsi-planti flexion de cheville	PDC	Blue hatched	Blue hatched	Blue hatched	Blue hatched
	CC	Red hatched	Red hatched	Red hatched	Red hatched
	GC	White	White	White	Green hatched
Inversion-éversion subtalaire	PDC	Blue hatched	Blue hatched	Blue hatched	Blue hatched
	CC	Red hatched	Red hatched	Red hatched	Red hatched
	GC	White	White	White	Green hatched
Flexion-extension métatarsophalangienne	PDC	Blue hatched	Blue hatched	Blue hatched	Blue hatched
Flexion-extension lombaire	PDC	Blue hatched	Blue hatched	Blue hatched	Blue hatched
	CC	Red hatched	Red hatched	Red hatched	Red hatched
	GC	Green hatched	Green hatched	Green hatched	Green hatched
Inclinaison latérale droite-gauche lombaire	PDC	Blue hatched	Blue hatched	Blue hatched	Blue hatched
	CC	Red hatched	Red hatched	Red hatched	Red hatched
	GC	Green hatched	Green hatched	Green hatched	Green hatched
Rotation axiale lombaire	PDC	Blue hatched	Blue hatched	Blue hatched	Blue hatched
	CC	Red hatched	Red hatched	Red hatched	Red hatched
	GC	Green hatched	Green hatched	Green hatched	Green hatched
Membres supérieurs	PDC	Blue hatched	Blue hatched	Blue hatched	Blue hatched
	GC	Green hatched	Green hatched	Green hatched	Green hatched



Plan de la soutenance

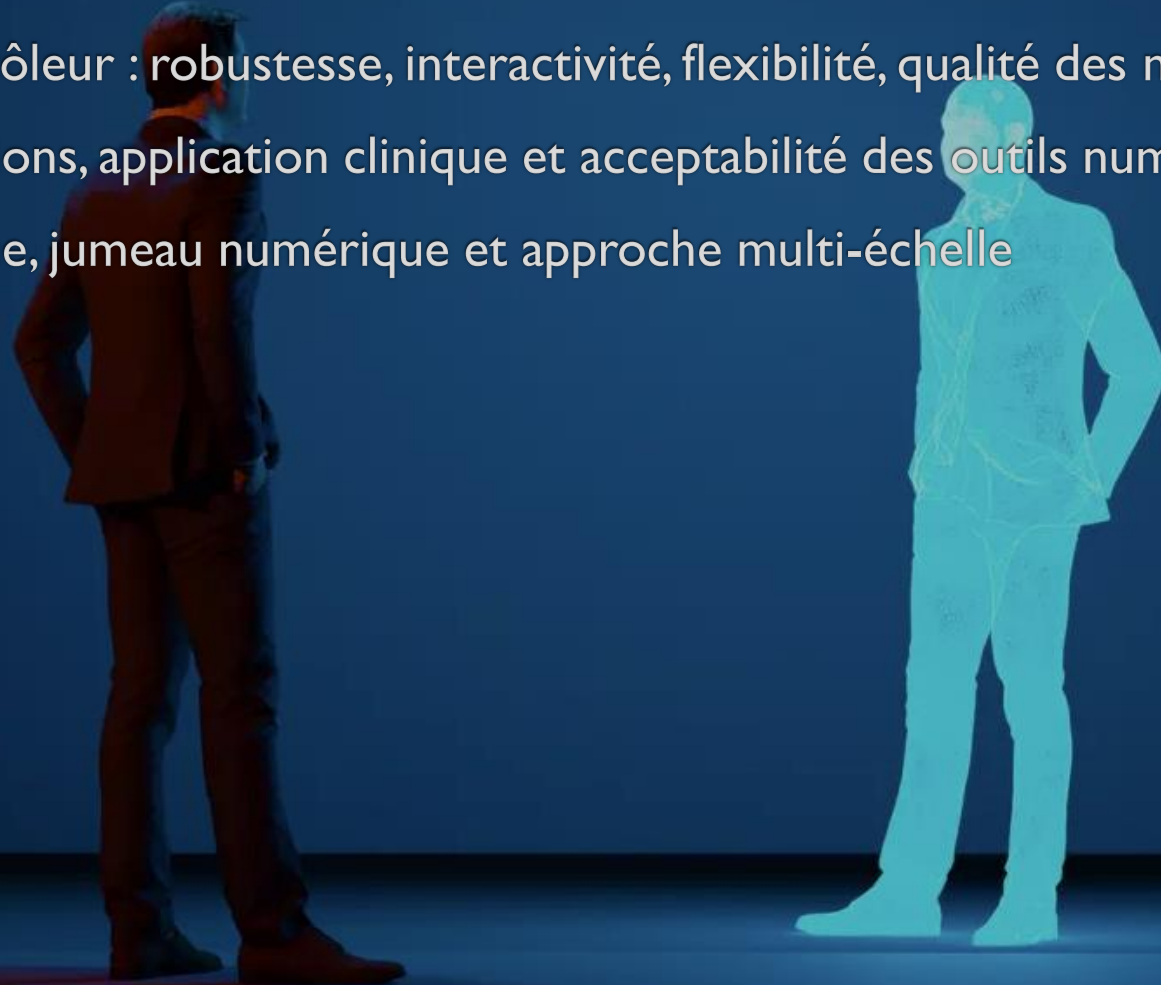
- ◇ Parcours de recherche
- ◇ Présentation des principes fondamentaux et des défis
- ◇ Résumé de travaux de recherche
- ◇ Conclusion et perspectives de recherche

Simulation prédictive de déficiences

- ◇ Simulation numérique en complément de l'expérimentation
 - ◇ contrôle des variables de simulation
 - ◇ mesure de quantités physiques difficiles à obtenir expérimentalement
 - ◇ aide à la planification de thérapie ou mise en situation différente
- ◇ Prise en compte de déficiences variées
 - ◇ troubles articulaires et musculaires (ex. sarcopénie, arthrose, amputation)
 - ◇ troubles cognitifs, sensoriels ou neurologiques
 - ◇ fonctionnement dégradé des capteurs, traitement des signaux de l'état, actionneurs dysfonctionnels

Défis à venir des simulateurs de mouvement

- ◆ Traitement des collisions et des forces de réaction
- ◆ Architecture du contrôleur : robustesse, interactivité, flexibilité, qualité des mouvements
- ◆ Validation des simulations, application clinique et acceptabilité des outils numériques
- ◆ Modélisation spécifique, jumeau numérique et approche multi-échelle



Merci pour votre attention

-  Merci à Qilei Li, Siubo Liang, Shun Zhang, Weidong Geng, Franck Multon, Richard Kulpa, Georges Dumont
-  Merci à Xavier Maurice, Anders Sandholm, Lazhari Assassi, Cédric Schwartz, Pascal Volino, Ronan Boulic, Daniel Thalmann, Nadia Magnenat-Thalmann, Mark de Zee, Michael Voigt
-  Merci à Thomas Geijtenbeek, Mart Hagens, Francis Laclé, Pieter Peeters, Rick van Rooij, Forough Madeh Khaksar, Zhiping Luo, Arjan Egges, Frank van der Stappen, Mark Overmars, Johan Jeuring
-  Merci à Samuel Carensac, Thomas Bonis, Vincent Gibeaux, Ana Lucia Cruz Ruiz, Charles Pontonnier, Saida Bouakaz, Raphaël Dumas, Gilmar F. Santos, Eike Jakobowitz, Christof Hurschler

◆ Investissement pédagogique

- ◆ Responsable du Master I Informatique en alternance (2016 à 2021)
- ◆ Montage et responsabilité du DIU Enseigner l'Informatique au Lycée (2018-2021)
- ◆ Montage et responsabilité de l'AEU de préparation au CAPES NSI (2019-2021)
- ◆ Montage et responsabilité du Master MEEF parcours NSI (depuis 2021)
- ◆ Responsabilité de 2 UE de licence à fort effectif (depuis 2016)
- ◆ Responsabilité de plusieurs UE en Master MEEF (depuis 2021)

◆ Participation à des comités de programme de conférences

- ◆ CGI depuis 2009, CASA depuis 2012, ISVC depuis 2009
- ◆ GRAPP 2013, 2014, 2015
- ◆ EuroGraphics 2013, 2015; VRST 2013, 2014
- ◆ MIG 2019, VRCAI 2022, ICVR 2023, ICIDM 2018, VMLS 2013, BioRob 2010, JIT 2022

◆ Participation à des comités de programme de journaux

- ◆ Editeur associé de CAVW depuis 2017
- ◆ Membre du panel éditorial de « Frontiers in Computer Graphics and Visualization » depuis 2021 et « Frontiers in Virtual Environments » depuis 2016

◆ Financements et projets de recherche

- ◆ Responsable WP ANI3 « Biomechanical Animation » du projet national néerlandais COMMIT en 2013 - 2014
- ◆ Porteur du projet ANR PRCI OMEGA (Optimization-based forward Musculoskeletal simulation of pathological GAit) de 2016 à 2021

◆ Jurys de thèse

- ◆ Thomas Geijtenbeek, Utrecht, 2013, invité
- ◆ Benjamin Niay, Rennes, 2022, examinateur

◆ Expertises

- ◆ Rapporteur de projet (IWT, Canada Foundation)
- ◆ Commission expertise Planétarium Vaux-En-Velin

◆ Responsabilités collectives et d'intérêt général

- ◆ Membre de la commission formation du département Informatique de Lyon I depuis 2016
- ◆ Membre nommé du conseil de laboratoire (LIRIS) depuis janvier 2021
- ◆ Membre du Conseil Consultatif de la Formation Continue (CCFC) de Lyon I depuis 2021
- ◆ Co-président de la commission d'élaboration des sujets du bac de la spécialité NSI organisée par le rectorat de Lyon depuis 2020
- ◆ Membre du jury régional (région académique Auvergne-Rhône-Alpes) du Trophée NSI en 2022
- ◆ Membre du collectif NSI INSPE-Rectorat de l'académie de Lyon depuis 2022
- ◆ Président de jury de bac en 2015, 2016 et 2018
- ◆ Membre de la commission d'évaluation des projets d'Actions Transversales du laboratoire (LIRIS) depuis septembre 2020
- ◆ Présentateur invité
 - ◆ workshop projet européen 3D Physiological Human en 2013
 - ◆ séminaire d'équipe ANIMA de l'INRIA Grenoble Rhône-Alpes en 2021
 - ◆ keynote à la conférence internationale Computer Graphics International (CGI) en 2021