



# Influence de la cinématique d'une articulation de genou polycentrique sur la marche d'un robot bipède

Arnaud Hamon, IRCCyN, Université de Nantes

12 décembre 2011

## Introduction

---

Introduction

## Le genou humain

---

Étude cinématique  
d'une articulation à  
4-barres

---

Modèles dynamiques et  
d'impact

---

Optimisation de  
trajectoire

---

Conclusions

---

# Introduction

Introduction

Introduction

Le genou humain

Étude cinématique  
d'une articulation à  
4-barres

Modèles dynamiques et  
d'impact

Optimisation de  
trajectoire

Conclusions

## Contexte de la thèse

De nombreux domaines de recherche s'intéressent à l'articulation du genou humain :

- La médecine pour la conception de prothèses et d'orthèses.
- La biomécanique pour la compréhension de la marche humaine
- La robotique pour améliorer les performances des robots humanoïdes.

Les problèmes liés à l'articulation du genou sont :

- L'articulation du genou humain est complexe et formée par des surfaces non symétriques.
- Elle ne peut être représentée par une ou plusieurs articulations pivots.

Introduction

Introduction

Le genou humain

Étude cinématique  
d'une articulation à  
4-barres

Modèles dynamiques et  
d'impact

Optimisation de  
trajectoire

Conclusions

## Objectif de travail

Les objectifs de ce travail de recherche sont :

- A partir des travaux en biomécanique sur l'étude de l'articulation du genou, proposer un mécanisme permettant de reproduire les mouvements observés chez l'homme.
- Mettre en place ce mécanisme sur un modèle simple de robot humanoïde et déterminer l'ensemble des modèles dynamiques et d'impacts nécessaires pour la génération de trajectoires de marche complexe.
- Proposer une méthode d'optimisation paramétrique pour générer 3 types de trajectoires de marche.
- Étudier l'effet de cette articulation de genou sur les performances de marche.

Introduction

---

**Le genou humain**

---

Les articulations du  
genou

Les mouvements de  
l'articulation du genou

Mouvement de  
roulement glissement  
dans le plan sagittal

Modélisation du genou

Étude cinématique  
d'une articulation à  
4-barres

---

Modèles dynamiques et  
d'impact

---

Optimisation de  
trajectoire

---

Conclusions

---

# Le genou humain

# Les articulations du genou

## Introduction

### Le genou humain

Les articulations du genou

Les mouvements de l'articulation du genou

Mouvement de roulement glissement dans le plan sagittal

Modélisation du genou

Étude cinématique d'une articulation à 4-barres

Modèles dynamiques et d'impact

Optimisation de trajectoire

Conclusions

Le genou humain est constitué de deux articulations qui lient le fémur le tibia et la *patella* (ou rotule).

## Liaison fémoro-Patellaire

Elle permet de limiter les forces exercées sur le genou, de limiter l'extension du genou et de limiter le glissement vers l'avant.

## Liaison fémoro-tibiale

- Elle joue le rôle principal dans la flexion.
- Deux surfaces de contact sur le fémur : condyles.
- Le plateau tibial avec deux cavités : glènes.



# Les mouvements de l'articulation du genou

Introduction

Le genou humain

Les articulations du genou

Les mouvements de l'articulation du genou

Mouvement de roulement glissement dans le plan sagittal

Modélisation du genou

Étude cinématique d'une articulation à 4-barres

Modèles dynamiques et d'impact

Optimisation de trajectoire

Conclusions

## Plan sagittal

On note une flexion de 0 à près de  $170^\circ$ .

Ce mouvement de flexion combine **une rotation et une translation** du fémur par rapport au tibia.

## Le plan horizontal

On observe **une rotation automatique** de  $10^\circ$  à  $15^\circ$  lors de la flexion du genou.

Cette rotation est due à la non-symétrie des condyles du fémur.

## Le plan frontal

On observe un mouvement dit de *varus-valgus*. Ce mouvement est **une rotation** d'environ  $10^\circ$ .



# Mouvement de roulement glissement dans le plan sagittal

Introduction

Le genou humain

Les articulations du genou

Les mouvements de l'articulation du genou

Mouvement de roulement glissement dans le plan sagittal

Modélisation du genou

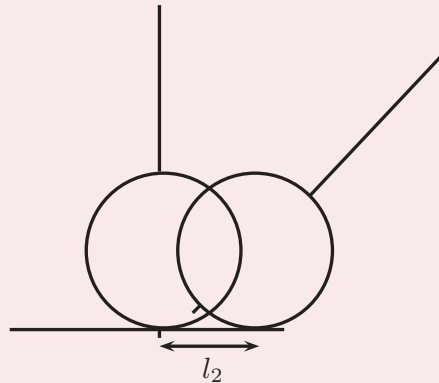
Étude cinématique d'une articulation à 4-barres

Modèles dynamiques et d'impact

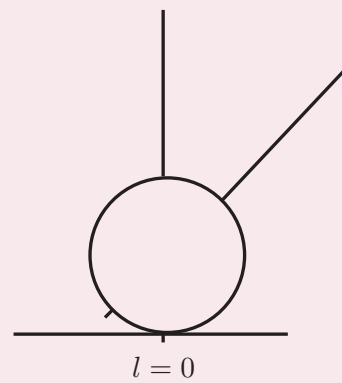
Optimisation de trajectoire

Conclusions

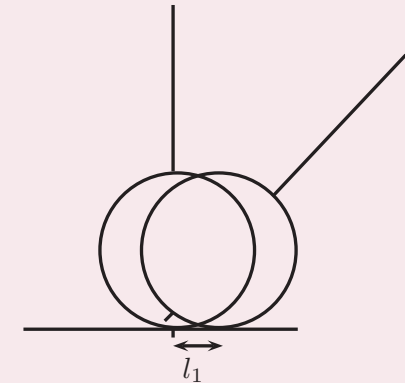
## Principe



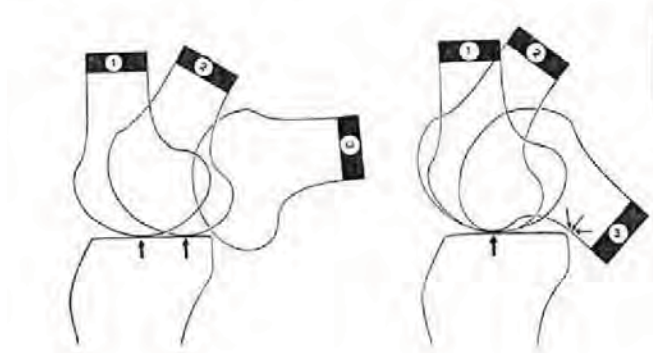
roulement pur



glissement pur



roulement glissement



## Intérêt

- Un roulement pur ou un glissement pur limite l'angle de flexion maximal.
- Le mouvement de roulement en début de flexion limite l'usure articulaire due aux frottements.

# Modélisation du genou

## Introduction

### Le genou humain

Les articulations du genou

Les mouvements de l'articulation du genou

Mouvement de roulement glissement dans le plan sagittal

Modélisation du genou

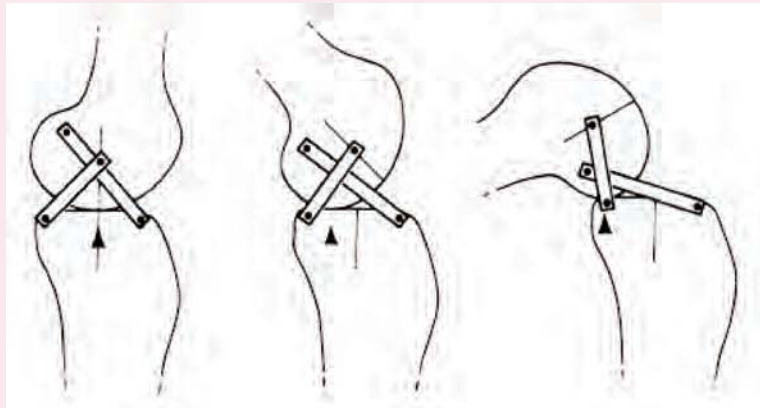
Étude cinématique d'une articulation à 4-barres

Modèles dynamiques et d'impact

Optimisation de trajectoire

Conclusions

## Modèle issue de la biomécanique [Menschik 1974]



Les dimensions des barres peuvent être choisies à partir des longueurs des ligaments croisés et de la position de leurs points d'insertion.

## Modèle issue de l'industrie, (Proteor ©, Ottobock ©)



Introduction

---

Le genou humain

---

Étude cinématique  
d'une articulation à  
4-barres

---

Détermination des  
singularités

Articulation du genou à  
4-barres choisie

Position du centre de  
rotation instantané

Rapport de réduction

Modèles dynamiques et  
d'impact

---

Optimisation de  
trajectoire

---

Conclusions

---

# Étude cinématique d'une articulation à 4-barres

# Détermination des singularités

Introduction

Le genou humain

Étude cinématique  
d'une articulation à  
4-barres

Détermination des  
singularités

Articulation du genou à  
4-barres choisie

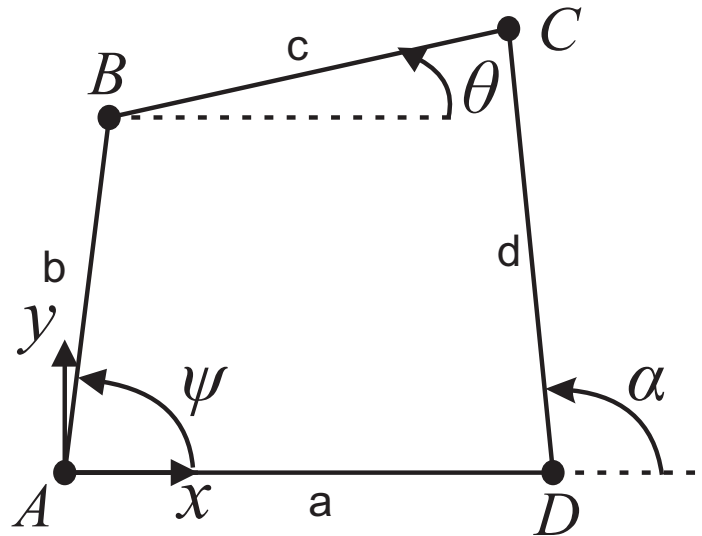
Position du centre de  
rotation instantané

Rapport de réduction

Modèles dynamiques et  
d'impact

Optimisation de  
trajectoire

Conclusions



On définit la fonction  $F(\alpha, \theta)$  à partir de l'équation de fermeture de boucle :

$$\mathbf{AB} + \mathbf{BC} = \mathbf{AD} + \mathbf{DC}$$

A partir de la méthode de [Freudenstein 2010] on obtient :

$$F(\alpha, \theta) = k_1 + k_2 \cos(\alpha) - k_3 \cos(\theta) - \cos(\theta - \alpha)$$

où  $k_1$ ,  $k_2$  et  $k_3$  dépendent des dimensions du mécanisme.

# Détermination des singularités

Introduction

Le genou humain

Étude cinématique  
d'une articulation à  
4-barres

Détermination des  
singularités

Articulation du genou à  
4-barres choisie

Position du centre de  
rotation instantané

Rapport de réduction

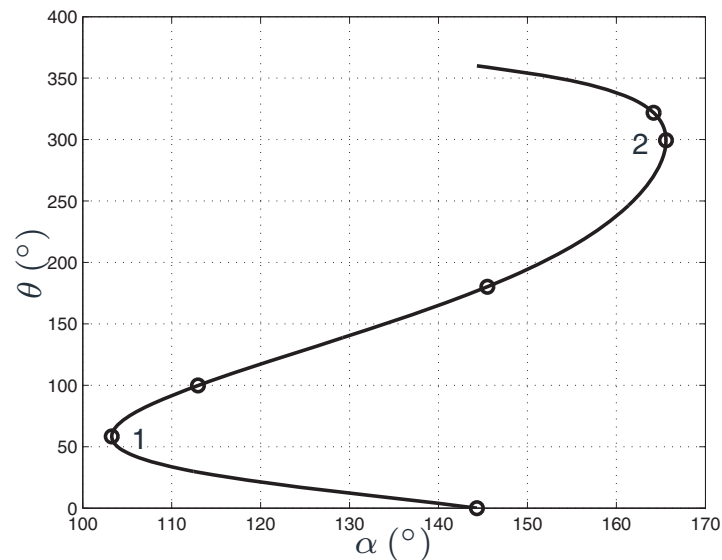
Modèles dynamiques et  
d'impact

Optimisation de  
trajectoire

Conclusions

## Singularités

A partir de l'équation entrée-sortie, on peut trouver la sortie  $\theta$  en fonction de l'entrée  $\alpha$  et des dimensions du mécanisme.



- Les points 1 et 2 correspondent à deux singularités.
- Dans cette position, une légère variation de  $\alpha$  peut entraîner une grande variation de  $\theta$ .
- Ces singularités correspondent à **une perte de rigidité** du mécanisme.

## Détermination analytique des singularités

Les positions des points de singularité du mécanisme peuvent être retrouvées en déterminant :

$$A = \frac{\partial F(\alpha, \theta)}{\partial \alpha} = 0$$

# Détermination des singularités

Introduction

Le genou humain

Étude cinématique  
d'une articulation à  
4-barres

Détermination des  
singularités

Articulation du genou à  
4-barres choisie

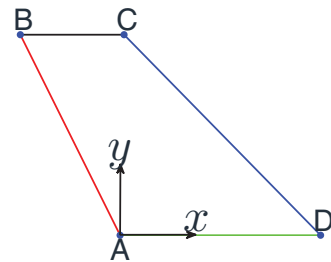
Position du centre de  
rotation instantané

Rapport de réduction

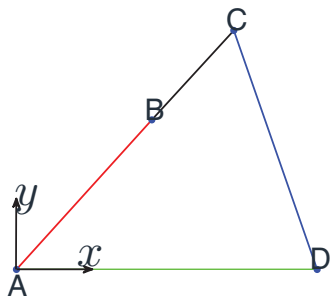
Modèles dynamiques et  
d'impact

Optimisation de  
trajectoire

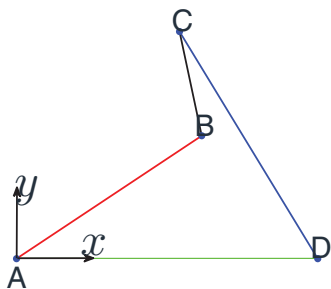
Conclusions



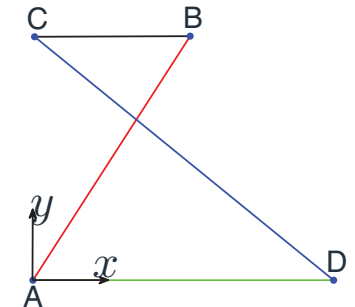
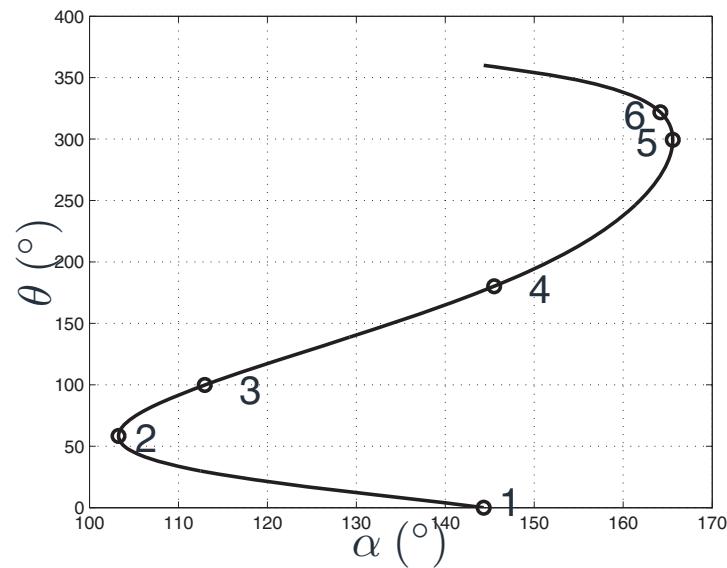
(a) Position 1



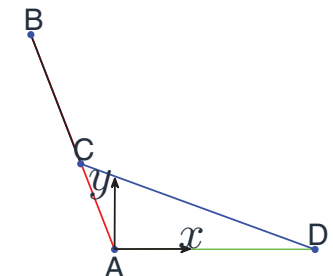
(b) Position 2



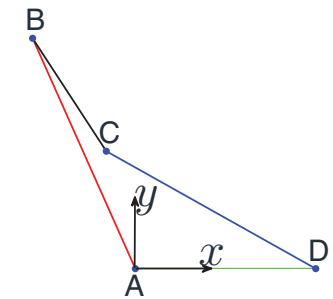
(c) Position 3



(d) Position 4



(e) Position 5



(f) Position 6

# Articulation du genou à 4-barres choisie

Introduction

Le genou humain

Étude cinématique  
d'une articulation à  
4-barres

Détermination des  
singularités

Articulation du genou à  
4-barres choisie

Position du centre de  
rotation instantané

Rapport de réduction

Modèles dynamiques et  
d'impact

Optimisation de  
trajectoire

Conclusions

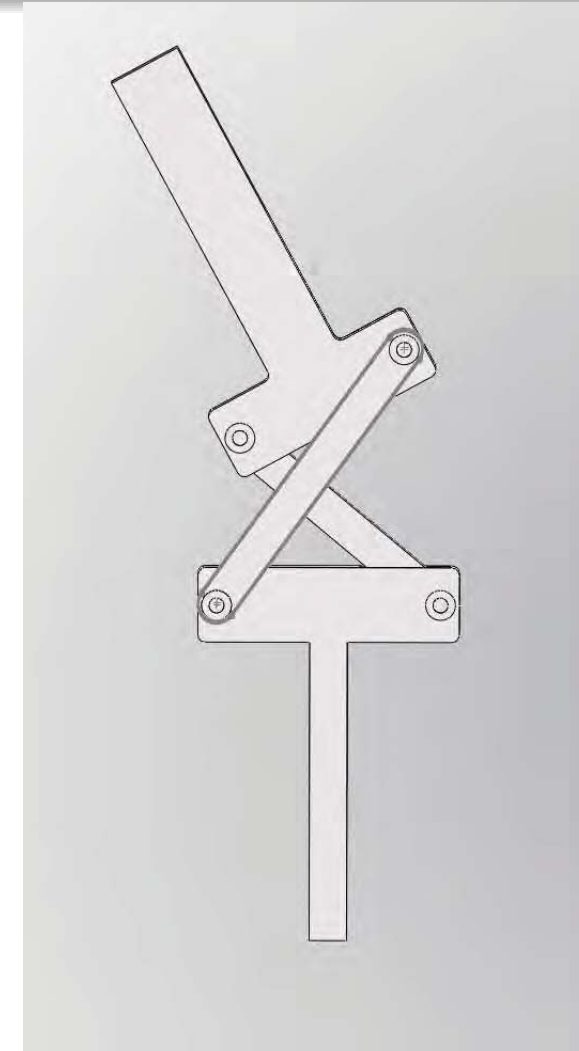
On utilise une articulation à 4-barres croisées pour le genou d'un robot bipède.

## Avantages

- Centre de rotation instantané variable avec un déplacement en arrière lors de la flexion
- Nécessite un seul actionneur, placé sur l'articulation supérieur droite.

## Inconvénients

- Présence de singularité lors de la flexion.
- Modèle dynamique plus complexe qu'une articulation pivot.
- Nécessite de résoudre des contraintes de boucle fermée.



# Position du centre de rotation instantané

Introduction

Le genou humain

Étude cinématique  
d'une articulation à  
4-barres

Détermination des  
singularités

Articulation du genou à  
4-barres choisie

Position du centre de  
rotation instantané

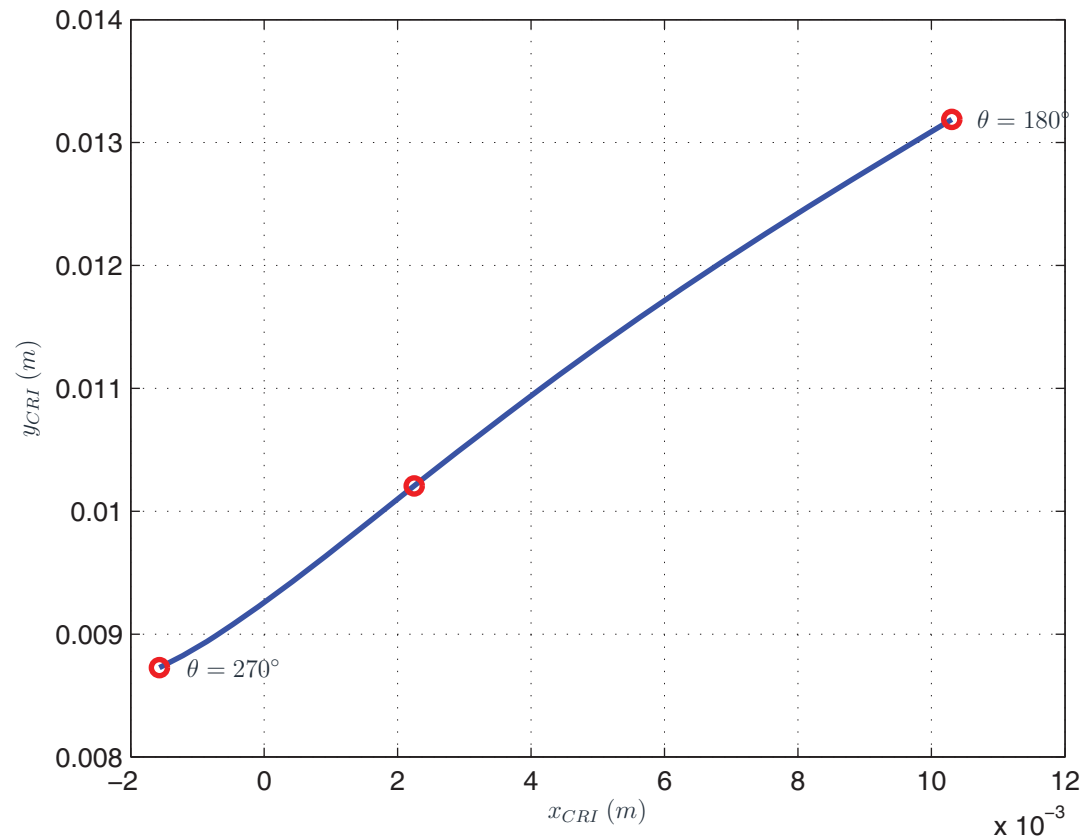
Rapport de réduction

Modèles dynamiques et  
d'impact

Optimisation de  
trajectoire

Conclusions

## CRI





# Rapport de réduction

Introduction

Le genou humain

Étude cinématique  
d'une articulation à  
4-barres

Détermination des  
singularités

Articulation du genou à  
4-barres choisie

Position du centre de  
rotation instantané

Rapport de réduction

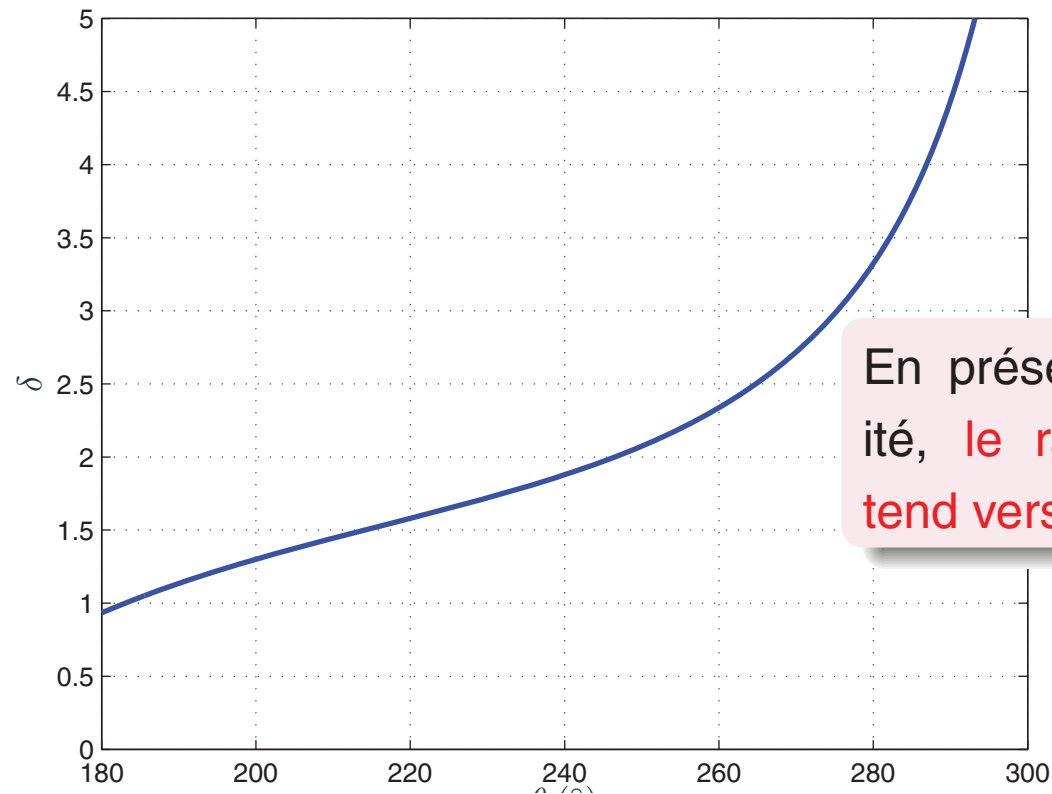
Modèles dynamiques et  
d'impact

Optimisation de  
trajectoire

Conclusions

Le mécanisme à 4-barres génère un rapport de réduction fonction de la position de l'articulation.

$$\delta = \left| \frac{\dot{\theta}}{\dot{\alpha}} \right| = \left| \frac{-k_3 \sin(\theta) + \sin(-\theta + \alpha)}{-k_2 \sin(\alpha) + \sin(-\theta + \alpha)} \right|$$



En présence d'une singularité, le rapport de réduction tend vers l'infini.

Introduction

---

Le genou humain

---

Étude cinématique  
d'une articulation à  
4-barres

---

Modèles dynamiques et  
d'impact

---

Présentation du robot

Simple appui

Double appui

Modèle d'impact

Optimisation de  
trajectoire

---

Conclusions

---

# Modèles dynamiques et d'impact

# Présentation du robot

Introduction

Le genou humain

Étude cinématique  
d'une articulation à  
4-barres

Modèles dynamiques et  
d'impact

Présentation du robot

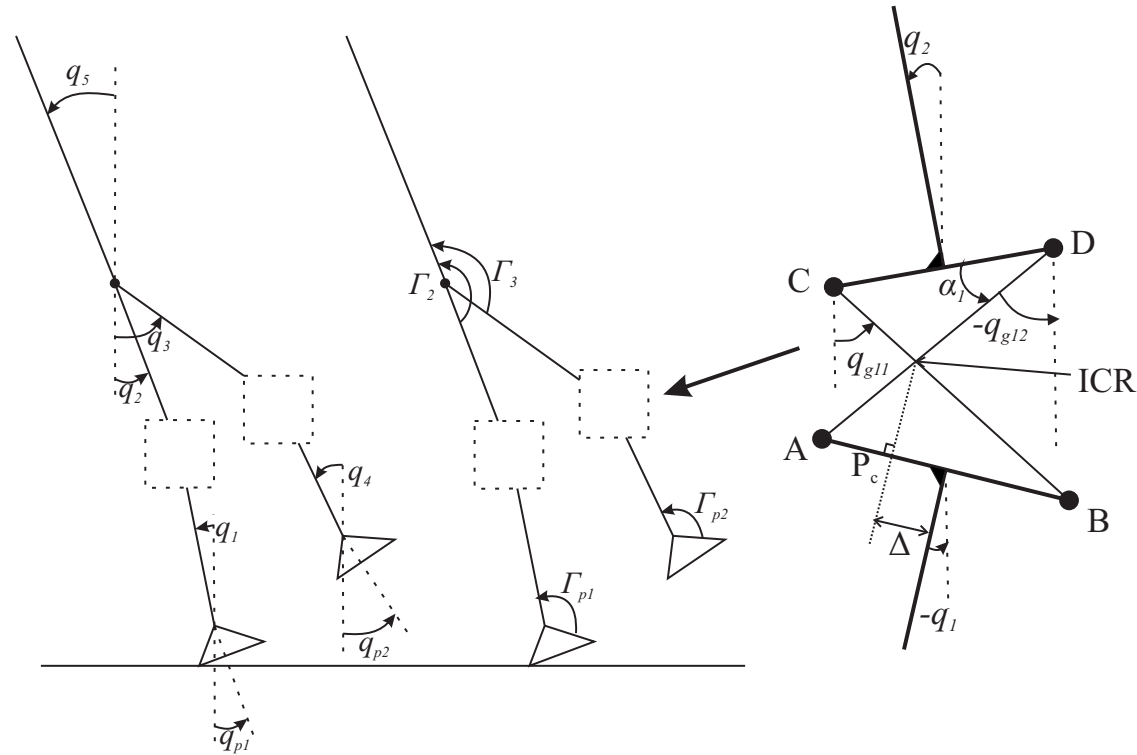
Simple appui

Double appui

Modèle d'impact

Optimisation de  
trajectoire

Conclusions



## Variables articulaires

- $[q_{p1}, q_{p2}]$  : orientations des pieds
- $[q_1, \dots, q_5]$  : orientations des corps principaux
- $[q_{g11}, q_{g12}, q_{g21}, q_{g22}]$  : orientations des barres croisées.

# Modèle dynamique d'un robot comportant des chaînes fermées

Introduction

Le genou humain

Étude cinématique  
d'une articulation à  
4-barres

Modèles dynamiques et  
d'impact

Présentation du robot

Simple appui

Double appui

Modèle d'impact

Optimisation de  
trajectoire

Conclusions

## Modèle à dimension minimale

$$\Gamma_i = \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial L}{\partial q_i}$$

- $q_i$  : orientations des corps principaux.
- $L$  : est calculé en résolvant les contraintes de fermeture de boucle

## Utilisation de multiplicateurs de Lagrange

$$\Gamma_i = \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial L}{\partial q_i} + \left[ \frac{\partial \Phi(q)}{\partial q_i} \right]^t \lambda$$

- $q_i$  : orientations de tous les corps.
- $\lambda$  : forces de fermeture.

# Modèle dynamique en phase de simple appui

Introduction

Le genou humain

Étude cinématique  
d'une articulation à  
4-barres

Modèles dynamiques et  
d'impact

Présentation du robot

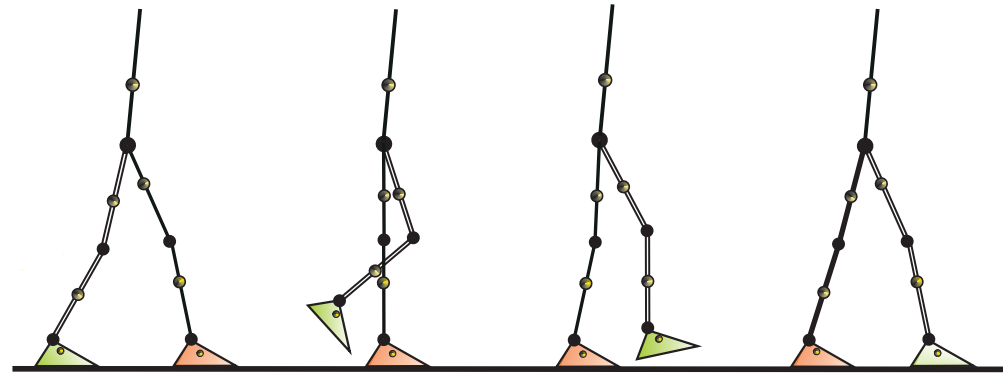
Simple appui

Double appui

Modèle d'impact

Optimisation de  
trajectoire

Conclusions



## Modèle dynamique réduit avec contact à plat au sol

En phase de simple appui, le pied d'appui du robot est en contact à plat avec le sol. Si le pied d'appui du robot reste en contact à plat sans glissement, le modèle dynamique inverse s'écrit :

$$\mathbf{A}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{Q}(\mathbf{q}) = [\mathbf{D}_\Gamma \mathbf{J}_c^t] \begin{bmatrix} \Gamma \\ \mathbf{F}_c \end{bmatrix}$$

où :

$$\mathbf{q} = [q_{p2}, q_1, q_2, q_3, q_4, q_5, q_{g11}, q_{g12}, q_{g21}, q_{g22}]^t$$

# Modèle dynamique en phase de simple appui

Introduction

Le genou humain

Étude cinématique  
d'une articulation à  
4-barres

Modèles dynamiques et  
d'impact

Présentation du robot

Simple appui

Double appui

Modèle d'impact

Optimisation de  
trajectoire

Conclusions

## Calcul des efforts de réaction du sol

En effectuant un bilan des efforts au centre de gravité du robot, nous pouvons déterminer la force de réaction du sol sur le pied :

$$\begin{cases} M \ddot{x}_g = R_{1x} \\ M \ddot{y}_g + Mg = R_{1y} \end{cases}$$

Le pied restera en contact avec le sol sans glissement si la force  $\mathbf{R}_1$  reste contenue dans le cône de frottement :

$$\begin{cases} -f R_{1y} - R_{1x} \leq 0 \\ -f R_{1y} + R_{1x} \leq 0 \end{cases}$$

Pour assurer que le pied reste en contact à plat sur le sol, nous devons assurer que le ZMP reste contenu dans la semelle.

$$l_{ZMP} = \frac{\Gamma_1 + s_{px} m_p g - H_p R_{1x}}{R_{1y}}$$

# Modèle dynamique en phase de double appui

Introduction

Le genou humain

Étude cinématique  
d'une articulation à  
4-barres

Modèles dynamiques et  
d'impact

Présentation du robot

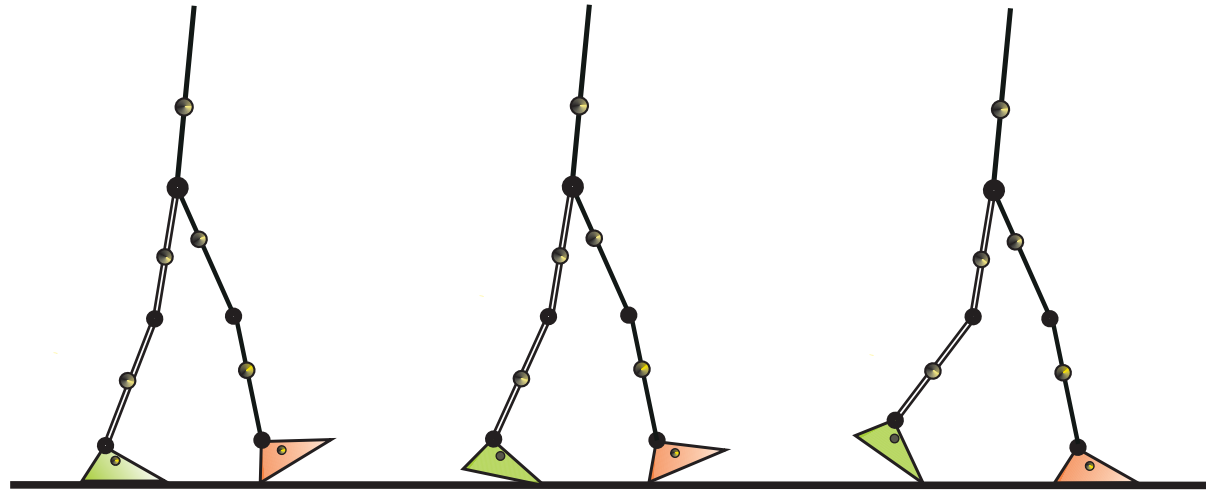
Simple appui

Double appui

Modèle d'impact

Optimisation de  
trajectoire

Conclusions



## Propriétés

- Nous considérons un double appui où les pieds sont en contact sur la pointe du pied arrière et sur le talon du pied avant.
- Cette phase est sur-actionnée. Il existe un ensemble de solutions valides.

# Modèle dynamique en phase de double appui

Introduction

Le genou humain

Étude cinématique  
d'une articulation à  
4-barres

Modèles dynamiques et  
d'impact

Présentation du robot

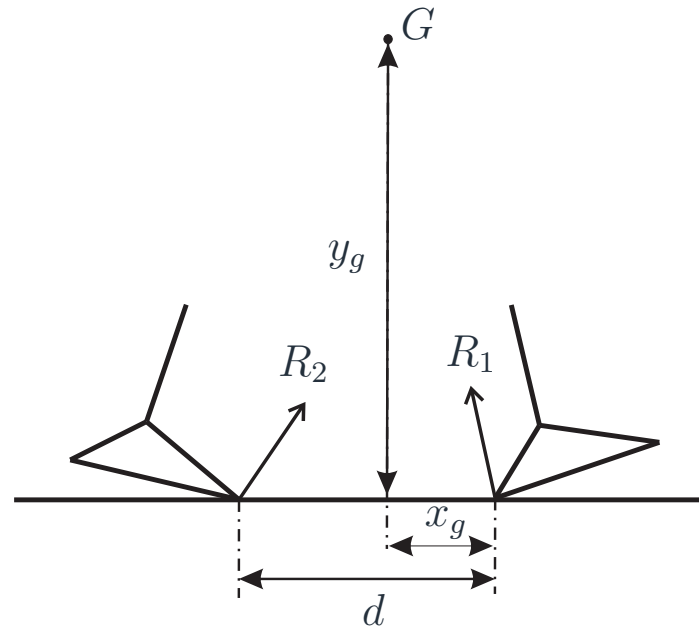
Simple appui

Double appui

Modèle d'impact

Optimisation de  
trajectoire

Conclusions



$$\begin{cases} y_g(R_{1x} + R_{2x}) + (d - x_g)R_{2y} + x_g R_{1y} = \delta_g \\ R_{1x} + R_{2x} = m\ddot{x}_g \\ R_{1y} + R_{2y} - mg = m\ddot{y}_g \end{cases}$$

Un système de 3 équations à 4 inconnues. Seules  $R_{1x}$  et  $R_{2x}$  peuvent être fixées.



# Modèle dynamique en phase de double appui

Introduction

Le genou humain

Étude cinématique  
d'une articulation à  
4-barres

Modèles dynamiques et  
d'impact

Présentation du robot

Simple appui

Double appui

Modèle d'impact

Optimisation de  
trajectoire

Conclusions

## Solutions

- En fixant  $R_{2x}$ , nous pouvons trouver une solution parmi l'ensemble des solutions valides.
- En considérant que le pied avant reste en contact avec le sol sans glissement, nous pouvons considérer une liaison implicite entre le sol et le talon.

## Modèle

$$\begin{bmatrix} \Gamma \\ \mathbf{F}_c \\ R_{2y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{D}_\Gamma & \mathbf{J}_g^t & \mathbf{J}_{2(:,2)}^t \end{bmatrix}^{-1} \left[ \mathbf{A}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{Q}(\mathbf{q}) - \mathbf{J}_{2(:,1)}^t R_{2x} \right]$$

où :

$$\mathbf{q} = [q_{p1}, q_{p2}, q_1, q_2, q_3, q_4, q_5, q_{g11}, q_{g12}, q_{g21}, q_{g22}]^t$$

Introduction

Le genou humain

Étude cinématique  
d'une articulation à  
4-barres

Modèles dynamiques et  
d'impact

Présentation du robot

Simple appui

Double appui

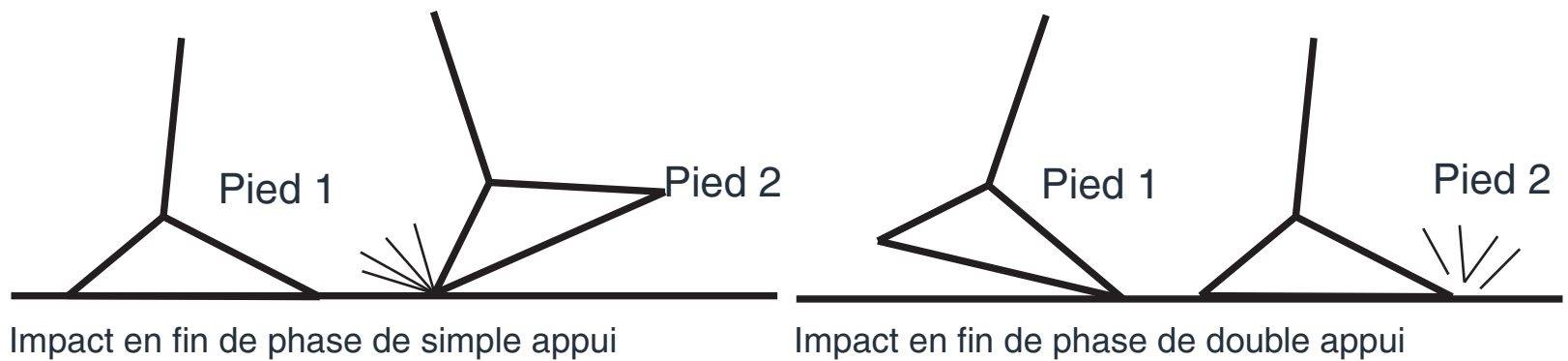
Modèle d'impact

Optimisation de  
trajectoire

Conclusions

## Principe

- Le pied du robot ainsi que le sol sont considérés comme rigides.
- Un impact apparaît lors du contact avec le sol du pied de transfert en fin de phase de simple appui.
- Un impact apparaît lors du contact à plat du pied avant, en fin de phase de double appui.



Introduction

Le genou humain

Étude cinématique  
d'une articulation à  
4-barres

Modèles dynamiques et  
d'impact

Présentation du robot

Simple appui

Double appui

Modèle d'impact

Optimisation de  
trajectoire

Conclusions

## Principe

Le modèle d'impact impulsionnel s'obtient par intégration du modèle dynamique général et des contraintes à l'instant de l'impact.

$$\mathbf{A}(\mathbf{X})\ddot{\mathbf{X}} + \mathbf{C}(\mathbf{X}, \dot{\mathbf{X}}) + \mathbf{Q}(\mathbf{X}) = [\mathbf{D}_\Gamma \mathbf{J}_c^t] \begin{bmatrix} \mathbf{\Gamma} \\ \mathbf{F}_c \end{bmatrix} + \mathbf{J}_1^t \mathbf{R}_1 + \mathbf{J}_2^t \mathbf{R}_2$$

avec :

$$\mathbf{X} = [q_{p1}, q_{p2}, q_1, q_2, q_3, q_4, q_5, q_{g11}, q_{g12}, q_{g21}, q_{g22}, x_h, y_h]^t$$

## En fin de phase de double appui ou entre deux phases de simple appui

$$\mathbf{A}(\mathbf{X})(\dot{\mathbf{X}}^+ - \dot{\mathbf{X}}^-) = \mathbf{J}_k^t \mathbf{I}_{R_k} + \mathbf{J}_c^t \mathbf{I}_{F_c}$$

$k$  étant l'indice du pied qui reste en contact avec le sol après l'impact.

Contraintes :

$$\begin{cases} J_k \dot{\mathbf{X}}^+ = 0 \\ J_c \dot{\mathbf{X}}^+ = 0 \end{cases}$$

Introduction

Le genou humain

Étude cinématique  
d'une articulation à  
4-barres

Modèles dynamiques et  
d'impact

Présentation du robot

Simple appui

Double appui

Modèle d'impact

Optimisation de  
trajectoire

Conclusions

## Principe

Le modèle d'impact impulsif s'obtient par intégration du modèle dynamique général et des contraintes à l'instant de l'impact.

$$\mathbf{A}(\mathbf{X})\ddot{\mathbf{X}} + \mathbf{C}(\mathbf{X}, \dot{\mathbf{X}}) + \mathbf{Q}(\mathbf{X}) = [\mathbf{D}_\Gamma \mathbf{J}_c^t] \begin{bmatrix} \Gamma \\ \mathbf{F}_c \end{bmatrix} + \mathbf{J}_1^t \mathbf{R}_1 + \mathbf{J}_2^t \mathbf{R}_2$$

avec :

$$\mathbf{X} = [q_{p1}, q_{p2}, q_1, q_2, q_3, q_4, q_5, q_{g11}, q_{g12}, q_{g21}, q_{g22}, x_h, y_h]^t$$

## En fin de phase de simple appui suivi d'un double appui

$$\mathbf{A}(\mathbf{X})(\dot{\mathbf{X}}^+ - \dot{\mathbf{X}}^-) = \mathbf{J}_1^t \mathbf{I}_{\mathbf{R}_1} + \mathbf{J}_2^t \mathbf{I}_{\mathbf{R}_2} + \mathbf{J}_c^t \mathbf{I}_{\mathbf{F}_c}$$

Contraintes :

$$\begin{cases} J_1 \dot{\mathbf{X}}^+ = 0 \\ J_2 \dot{\mathbf{X}}^+ = 0 \\ J_c \dot{\mathbf{X}}^+ = 0 \end{cases}$$

ici on assure uniquement que la pointe du pied en arrière reste en contact avec le sol après l'impact.

Introduction

---

Le genou humain

---

Étude cinématique  
d'une articulation à  
4-barres

---

Modèles dynamiques et  
d'impact

---

Optimisation de  
trajectoire

---

Problème général

Marche de type 1

Marche de type 2

Marche de type 3

Ajout de ressort sur  
l'articulation à 4-barres

Conclusions

---

# Optimisation de trajectoire

Introduction

Le genou humain

Étude cinématique  
d'une articulation à  
4-barres

Modèles dynamiques et  
d'impact

Optimisation de  
trajectoire

Problème général

Marche de type 1

Marche de type 2

Marche de type 3

Ajout de ressort sur  
l'articulation à 4-barres

Conclusions

## Principe

- Objectif : générer des trajectoires de marche cyclique pour notre robot bipède.
- Méthode : On utilise une méthode d'optimisation paramétrique sous contraintes.
- Algorithme de résolution : Algorithme d'optimisation de type SQP (Sequential Quadratic Programming)  $\iff$  *fmincon*. Algorithme d'optimisation locale.
- Critère :

$$C_{\Gamma} = \frac{1}{d} \int_0^T \Gamma^t \Gamma dt$$

# Problème général

Introduction

Le genou humain

Étude cinématique  
d'une articulation à  
4-barres

Modèles dynamiques et  
d'impact

Optimisation de  
trajectoire

Problème général

Marche de type 1

Marche de type 2

Marche de type 3

Ajout de ressort sur  
l'articulation à 4-barres

Conclusions

## Contraintes

- Assurer que le (ou les pieds) en appui reste(nt) en contact avec le sol sans glissement.

$$\begin{cases} f \cdot |R_y| \leq |R_x| \\ R_y > 0 \end{cases}$$

- Assurer en phase de simple appui que le pied reste à plat au sol en vérifiant que le ZMP reste dans la semelle :

$$ZMP_{min} < ZMP < ZMP_{max}$$

- Assurer que les positions, vitesses et couples articulaires respectent les contraintes technologiques.
- Assurer que le pied en balancement n'entre pas en contact avec le sol avant la fin de la phase de simple appui.
- Assurer que la solution du modèle d'impact est valide en déterminant la position du ZMP à l'impact et en calculant les vitesses de décollement des extrémités du pied de transfert.

# Marche de type 1

Introduction

Le genou humain

Étude cinématique  
d'une articulation à  
4-barres

Modèles dynamiques et  
d'impact

Optimisation de  
trajectoire

Problème général

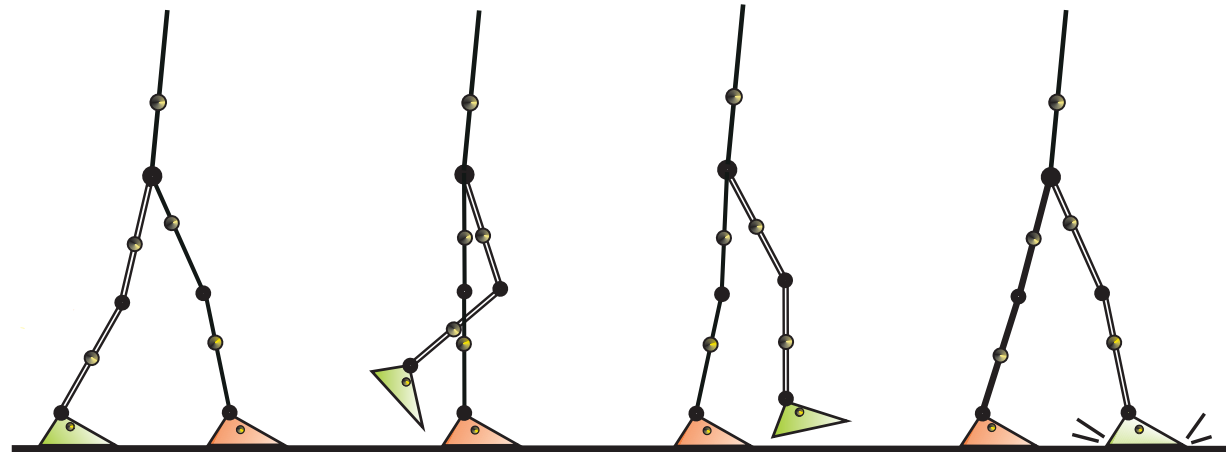
Marche de type 1

Marche de type 2

Marche de type 3

Ajout de ressort sur  
l'articulation à 4-barres

Conclusions



## Principe

- Cette marche est constituée uniquement de phases de simple appui.
- Un impact impulsionnel apparaît lors du contact du pied de transfert avec le sol en fin de phase de simple appui.



# Marche de type 1

Introduction

Le genou humain

Étude cinématique  
d'une articulation à  
4-barres

Modèles dynamiques et  
d'impact

Optimisation de  
trajectoire

Problème général

Marche de type 1

Marche de type 2

Marche de type 3

Ajout de ressort sur  
l'articulation à 4-barres

Conclusions

Phase de simple appui :

- 6 splines cubiques avec 1 point de passage

Phase		Marche de type 1		Marche de type 2		Marche de type 3	
		Variables	Paramètres	Variables	Paramètres	Variables	Paramètres
Simple appui	$q(0)$ $q(T)$ $q(T/2)$ $\dot{q}(0)$ $\dot{q}(T)$						
Double appui							
Simple appui sous actionné							
Total							

# Marche de type 1

Introduction

Le genou humain

Étude cinématique  
d'une articulation à  
4-barres

Modèles dynamiques et  
d'impact

Optimisation de  
trajectoire

Problème général

Marche de type 1

Marche de type 2

Marche de type 3

Ajout de ressort sur  
l'articulation à 4-barres

Conclusions

Phase de simple appui :

- 6 splines cubiques avec 1 point de passage

Phase		Marche de type 1		Marche de type 2		Marche de type 3	
		Variables	Paramètres	Variables	Paramètres	Variables	Paramètres
Simple appui	$q(0)$	6					
	$q(T)$	6					
	$q(T/2)$	6					
	$\dot{q}(0)$	6					
	$\dot{q}(T)$	6					
Double appui							
Simple appui sous actionné							
Total		30					

# Marche de type 1

Introduction

Le genou humain

Étude cinématique  
d'une articulation à  
4-barres

Modèles dynamiques et  
d'impact

Optimisation de  
trajectoire

Problème général

Marche de type 1

Marche de type 2

Marche de type 3

Ajout de ressort sur  
l'articulation à 4-barres

Conclusions

Phase de simple appui :

- 6 splines cubiques avec 1 point de passage
- Condition de cyclicité et prise en compte du MGI

Phase		Marche de type 1		Marche de type 2		Marche de type 3	
		Variables	Paramètres	Variables	Paramètres	Variables	Paramètres
Simple appui	$q(0)$	6					
	$q(T)$	6					
	$q(T/2)$	6					
	$\dot{q}(0)$	6					
	$\dot{q}(T)$	6					
Double appui							
Simple appui sous actionné							
Total		30					

# Marche de type 1

Introduction

Le genou humain

Étude cinématique  
d'une articulation à  
4-barres

Modèles dynamiques et  
d'impact

Optimisation de  
trajectoire

Problème général

Marche de type 1

Marche de type 2

Marche de type 3

Ajout de ressort sur  
l'articulation à 4-barres

Conclusions

Phase de simple appui :

- 6 splines cubiques avec 1 point de passage
- Condition de cyclicité et prise en compte du MGI

Phase		Marche de type 1		Marche de type 2		Marche de type 3	
		Variables	Paramètres	Variables	Paramètres	Variables	Paramètres
Simple appui	$q(0)$	6					
	$q(T)$	6	4				
	$q(T/2)$	6	6				
	$\dot{q}(0)$	6					
	$\dot{q}(T)$	6	6				
Double appui							
Simple appui sous actionné							
Total		30	16				

# Marche de type 1

Introduction

Le genou humain

Étude cinématique  
d'une articulation à  
4-barres

Modèles dynamiques et  
d'impact

Optimisation de  
trajectoire

Problème général

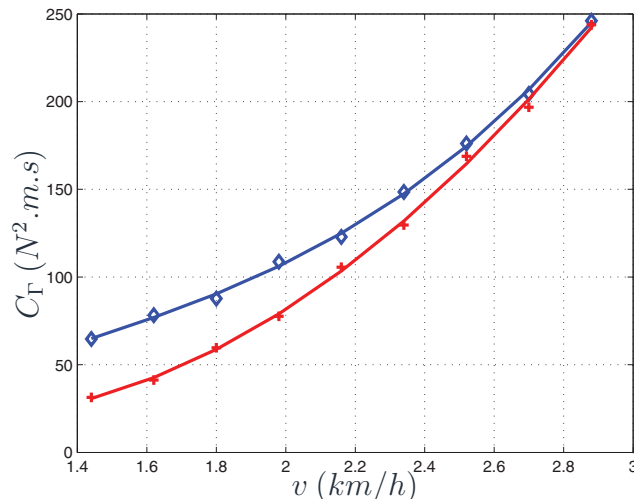
Marche de type 1

Marche de type 2

Marche de type 3

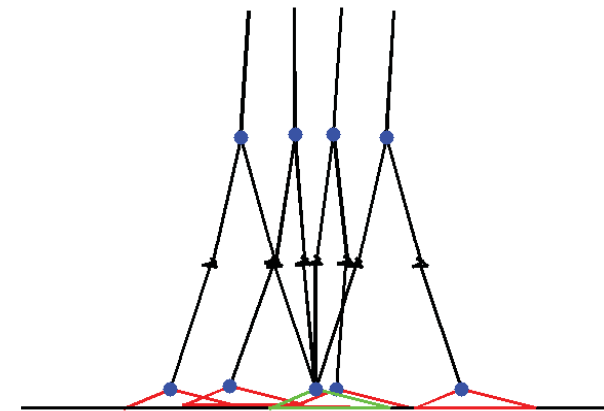
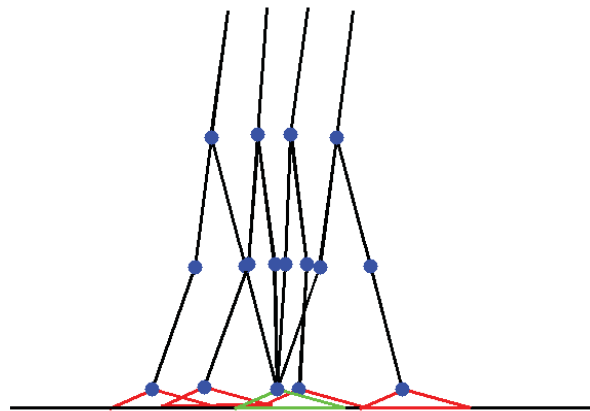
Ajout de ressort sur  
l'articulation à 4-barres

Conclusions



## Résultats

Réduction de la consommation énergétique en utilisant des genoux à 4-barres. [Hamon, Aoustin, IEEE Humanoids 2010]



# Marche de type 1

## Introduction

## Le genou humain

## Étude cinématique d'une articulation à 4-barres

## Modèles dynamiques et d'impact

## Optimisation de trajectoire

## Problème général

## Marche de type 1

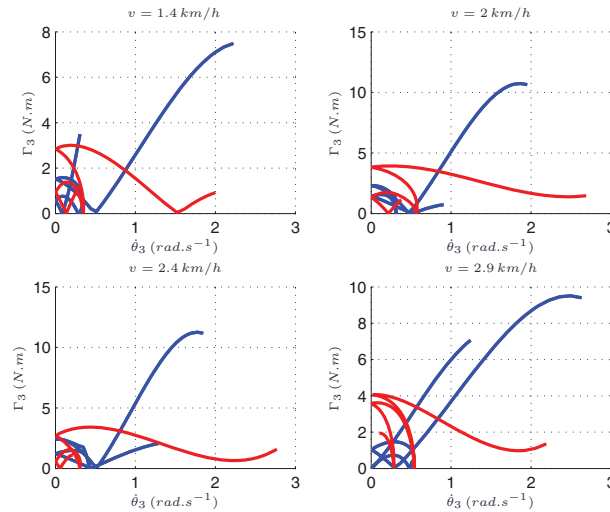
## Marche de type 2

## Marche de type 3

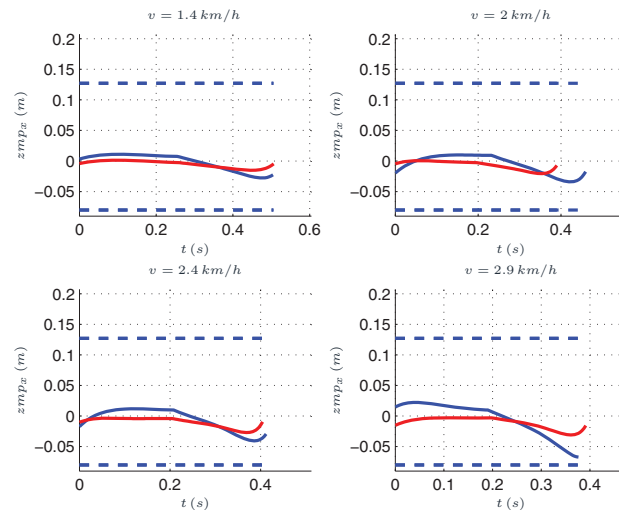
## Ajout de ressort sur l'articulation à 4-barres

## Conclusions

## Couple-vitesse



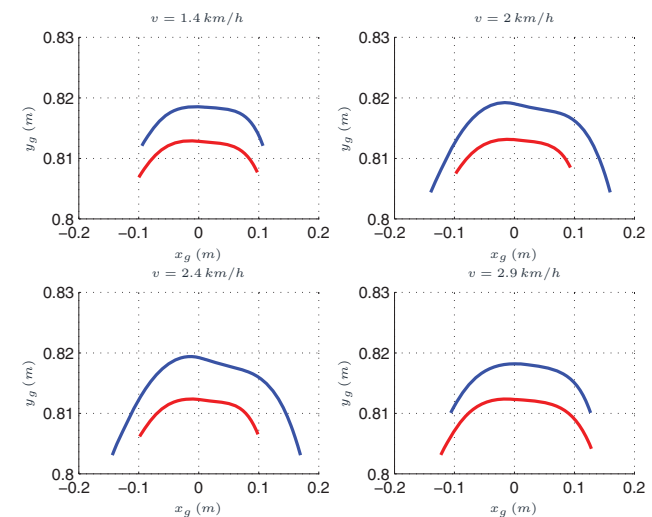
## Évolution du ZMP :



## Répartition des consommations par articulation

Report de la consommation d'énergie de la hanche de support vers la cheville de support avec genou 4-barres par rapport au genou pivot.

## Évolution du centre de gravité :



# Marche de type 2

Introduction

Le genou humain

Étude cinématique  
d'une articulation à  
4-barres

Modèles dynamiques et  
d'impact

Optimisation de  
trajectoire

Problème général

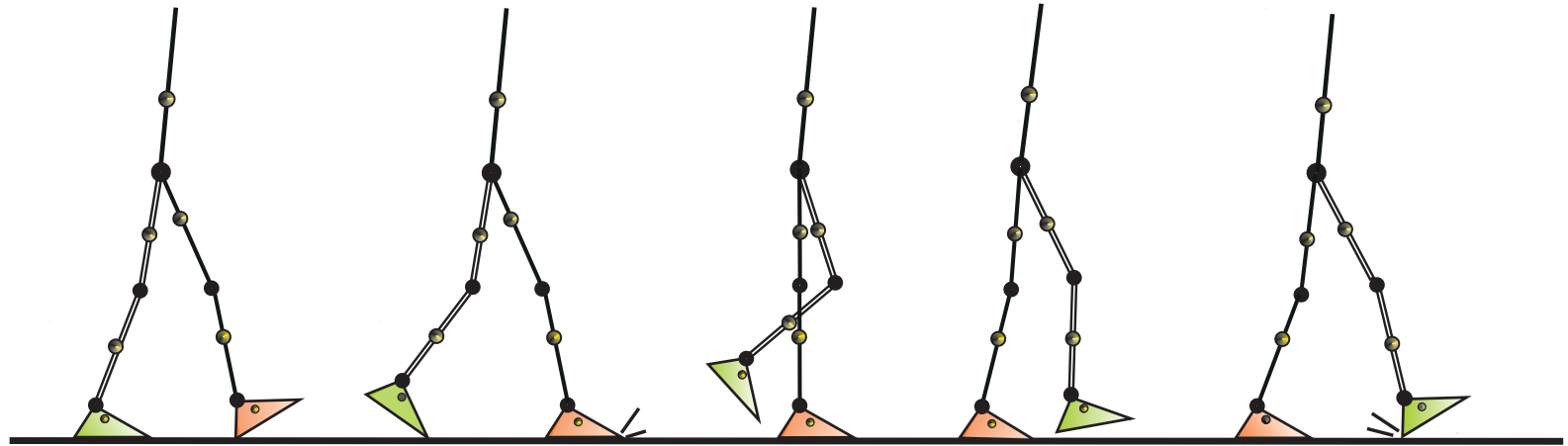
Marche de type 1

Marche de type 2

Marche de type 3

Ajout de ressort sur  
l'articulation à 4-barres

Conclusions



## Principe

- Cette marche est constituée de phases de double appui et de phases de simple appui.
- Lors de la phase de double appui les deux pieds tournent autour du talon du pied avant et de la pointe du pied arrière.
- La phase de double appui se termine lors du contact à plat du pied avant avec le sol.
- Un impact apparaît en fin de phase de double appui lors du contact à plat avec le sol du pied avant.
- Un impact apparaît lors du contact du pied de transfert avec le sol en fin de phase de simple appui.

# Marche de type 2

Introduction

Le genou humain

Étude cinématique  
d'une articulation à  
4-barres

Modèles dynamiques et  
d'impact

Optimisation de  
trajectoire

Problème général

Marche de type 1

Marche de type 2

Marche de type 3

Ajout de ressort sur  
l'articulation à 4-barres

Conclusions

Phase de simple appui :

- 6 splines cubiques avec 1 point de passage

Phase		Marche de type 1		Marche de type 2		Marche de type 3	
		Variables	Paramètres	Variables	Paramètres	Variables	Paramètres
Simple appui	$q(0)$	6					
	$q(T)$	6	4				
	$q(T/2)$	6	6				
	$\dot{q}(0)$	6					
	$\dot{q}(T)$	6	6				
Double appui	$q(0)$						
	$q(T)$						
	$\dot{q}(0)$						
	$\dot{q}(T)$						
	$R_{2x}$ $T_{ds}$						
Simple appui sous actionné							
Total		30	16				



# Marche de type 2

Introduction

Le genou humain

Étude cinématique  
d'une articulation à  
4-barres

Modèles dynamiques et  
d'impact

Optimisation de  
trajectoire

Problème général

Marche de type 1

Marche de type 2

Marche de type 3

Ajout de ressort sur  
l'articulation à 4-barres

Conclusions

Phase de simple appui :

- 6 splines cubiques avec 1 point de passage

Phase		Marche de type 1		Marche de type 2		Marche de type 3	
		Variables	Paramètres	Variables	Paramètres	Variables	Paramètres
Simple appui	$q(0)$	6		6			
	$q(T)$	6	4	6			
	$q(T/2)$	6	6	6			
	$\dot{q}(0)$	6		6			
	$\dot{q}(T)$	6	6	6			
Double appui	$q(0)$						
	$q(T)$						
	$\dot{q}(0)$						
	$\dot{q}(T)$						
	$R_{2x}$ $T_{ds}$						
Simple appui sous actionné							
Total		30	16				

# Marche de type 2

Introduction

Le genou humain

Étude cinématique  
d'une articulation à  
4-barres

Modèles dynamiques et  
d'impact

Optimisation de  
trajectoire

Problème général

Marche de type 1

Marche de type 2

Marche de type 3

Ajout de ressort sur  
l'articulation à 4-barres

Conclusions

Phase de simple appui :

- 6 splines cubiques avec 1 point de passage

Phase de double appui :

- 7 polynômes d'ordre 3

Phase		Marche de type 1		Marche de type 2		Marche de type 3	
		Variables	Paramètres	Variables	Paramètres	Variables	Paramètres
Simple appui	$q(0)$	6		6			
	$q(T)$	6	4	6			
	$q(T/2)$	6	6	6			
	$\dot{q}(0)$	6		6			
	$\dot{q}(T)$	6	6	6			
Double appui	$q(0)$			7			
	$q(T)$			7			
	$\dot{q}(0)$			7			
	$\dot{q}(T)$			7			
	$R_{2x}$			3			
	$T_{ds}$			1			
Simple appui sous actionné							
Total		30	16	62			

# Marche de type 2

Introduction

Le genou humain

Étude cinématique  
d'une articulation à  
4-barres

Modèles dynamiques et  
d'impact

Optimisation de  
trajectoire

Problème général

Marche de type 1

Marche de type 2

Marche de type 3

Ajout de ressort sur  
l'articulation à 4-barres

Conclusions

Phase de simple appui :

- 6 splines cubiques avec 1 point de passage

Phase de double appui :

- 7 polynômes d'ordre 3

⇒ Condition de cyclicité et prise en compte du MGI

Phase		Marche de type 1		Marche de type 2		Marche de type 3	
		Variables	Paramètres	Variables	Paramètres	Variables	Paramètres
Simple appui	$q(0)$	6		6			
	$q(T)$	6	4	6	4		
	$q(T/2)$	6	6	6	6		
	$\dot{q}(0)$	6		6			
	$\dot{q}(T)$	6	6	6	6		
Double appui	$q(0)$			7			
	$q(T)$			7	5		
	$\dot{q}(0)$			7			
	$\dot{q}(T)$			7	5		
	$R_{2x}$			3	3		
	$T_{ds}$			1	1		
Simple appui sous actionné							
Total		30	16	62			

# Marche de type 2

Introduction

Le genou humain

Étude cinématique  
d'une articulation à  
4-barres

Modèles dynamiques et  
d'impact

Optimisation de  
trajectoire

Problème général

Marche de type 1

Marche de type 2

Marche de type 3

Ajout de ressort sur  
l'articulation à 4-barres

Conclusions

Phase de simple appui :

- 6 splines cubiques avec 1 point de passage

Phase de double appui :

- 7 polynômes d'ordre 3

⇒ Condition de cyclicité et prise en compte du MGI

Phase		Marche de type 1		Marche de type 2		Marche de type 3	
		Variables	Paramètres	Variables	Paramètres	Variables	Paramètres
Simple appui	$q(0)$	6		6			
	$q(T)$	6	4	6	4		
	$q(T/2)$	6	6	6	6		
	$\dot{q}(0)$	6		6			
	$\dot{q}(T)$	6	6	6	6		
Double appui	$q(0)$			7			
	$q(T)$			7	5		
	$\dot{q}(0)$			7			
	$\dot{q}(T)$			7	5		
	$R_{2x}$			3	3		
	$T_{ds}$			1	1		
Simple appui sous actionné							
Total		30	16	62	30		

# Marche de type 2

Introduction

Le genou humain

Étude cinématique  
d'une articulation à  
4-barres

Modèles dynamiques et  
d'impact

Optimisation de  
trajectoire

Problème général

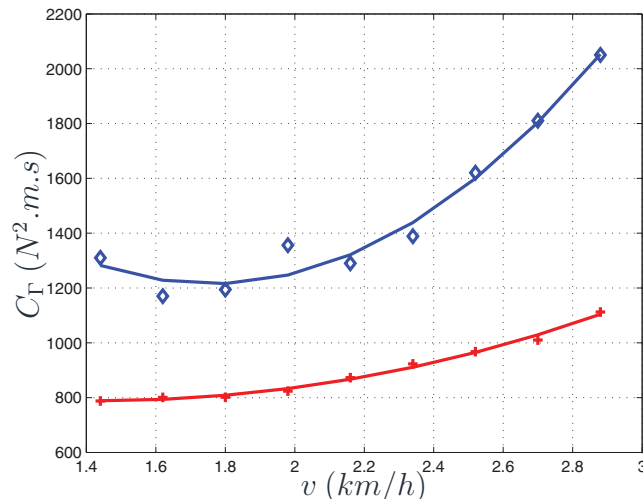
Marche de type 1

Marche de type 2

Marche de type 3

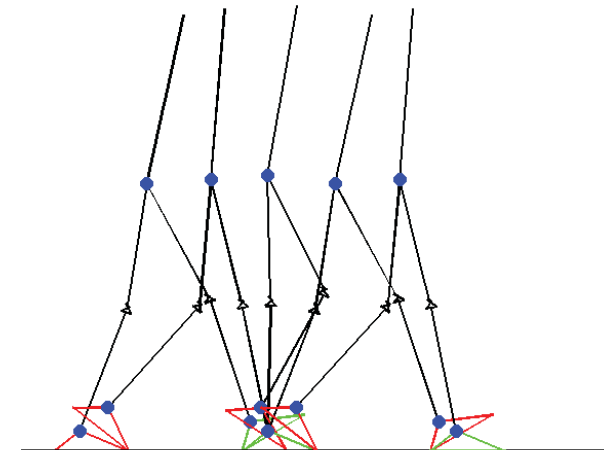
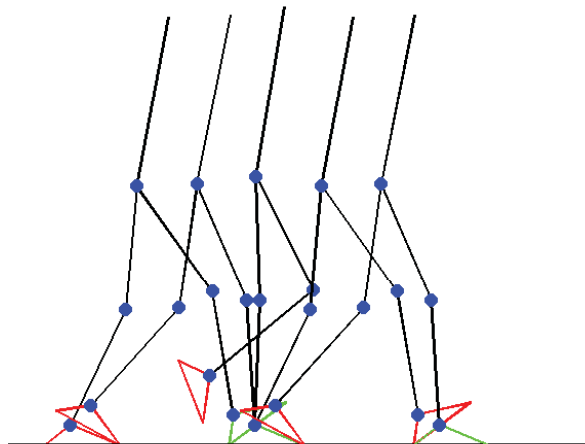
Ajout de ressort sur  
l'articulation à 4-barres

Conclusions



## Résultats

- Réduction de la consommation d'énergie du robot.
- Algorithme d'optimisation plus stable dans le cas de genoux 4-barres.



# Marche de type 2

## Introduction

## Le genou humain

## Étude cinématique d'une articulation à 4-barres

## Modèles dynamiques et d'impact

## Optimisation de trajectoire

### Problème général

### Marche de type 1

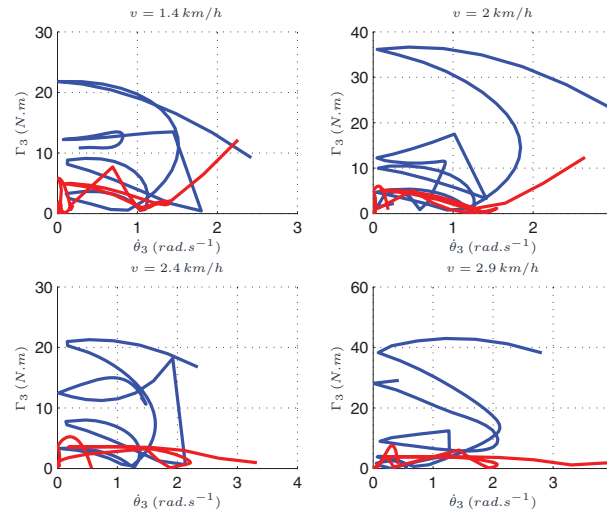
### Marche de type 2

### Marche de type 3

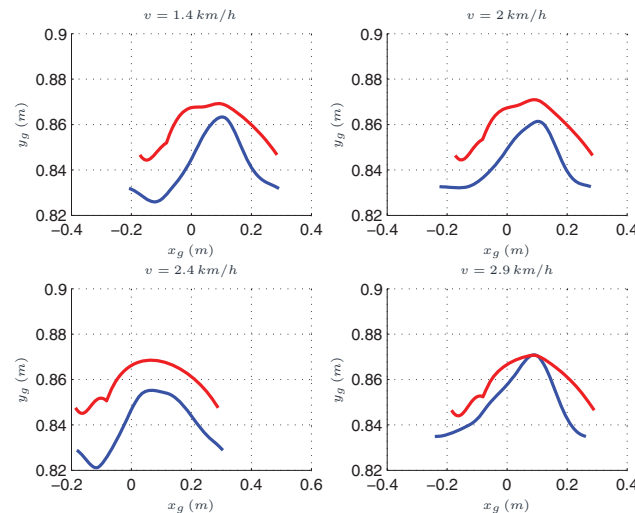
### Ajout de ressort sur l'articulation à 4-barres

## Conclusions

## Couple-vitesse



## Position du centre de gravité



## Autres résultats

- Répartition différente de la consommation entre les actionneurs.
- Impact en fin de phase de simple appui réduit avec genoux à 4-barres.
- Impact en fin de phase de double appui plus important avec genoux 4-barres.

# Marche de type 2

Introduction

Le genou humain

Étude cinématique  
d'une articulation à  
4-barres

Modèles dynamiques et  
d'impact

Optimisation de  
trajectoire

Problème général

Marche de type 1

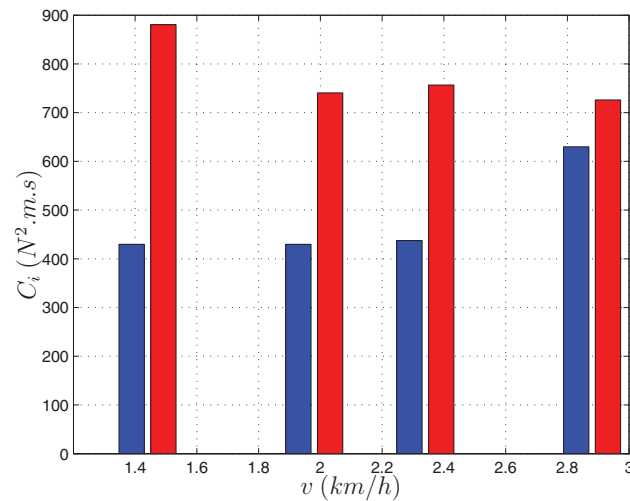
Marche de type 2

Marche de type 3

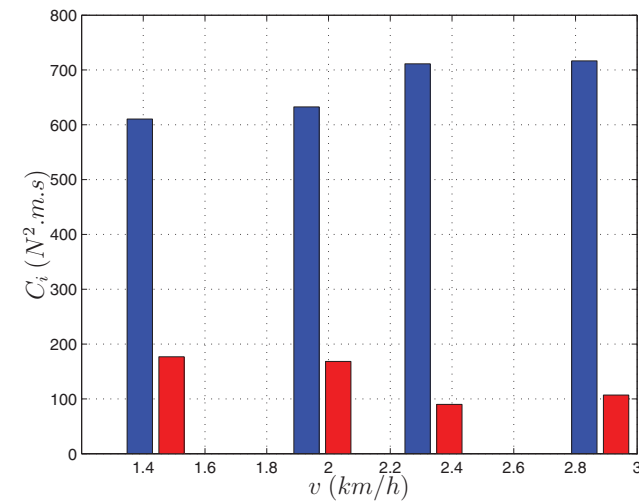
Ajout de ressort sur  
l'articulation à 4-barres

Conclusions

## Répartition double appui simple appui



genoux pivots



genoux 4-barres

Avec genoux 4-barres la phase de double appui apparaît comme une phase de propulsion dont la consommation énergétique est beaucoup plus importante que celle de la phase de simple appui.

# Marche de type 3

Introduction

Le genou humain

Étude cinématique  
d'une articulation à  
4-barres

Modèles dynamiques et  
d'impact

Optimisation de  
trajectoire

Problème général

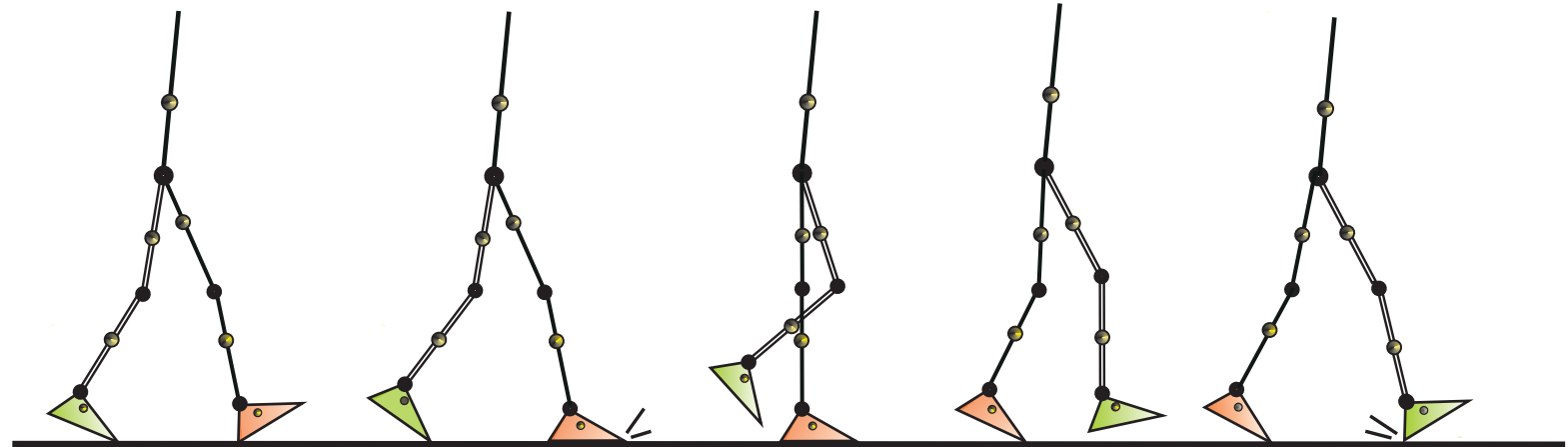
Marche de type 1

Marche de type 2

Marche de type 3

Ajout de ressort sur  
l'articulation à 4-barres

Conclusions



## Principe

- Cette marche est constituée de phases de double appui, de phases de simple appui pied à plat et de phases de simple appui avec rotation du pied d'appui autour de la pointe.
- Lors de la phase de double appui les deux pieds tournent autour du talon du pied avant et de la pointe du pied arrière.
- La phase de double appui se termine lors du contact à plat du pied avant avec le sol.
- Un impact apparaît en fin de phase de double appui lors du contact à plat avec le sol du pied avant.
- Un impact apparaît lors du contact du pied de transfert avec le sol en fin de phase de simple appui.



Introduction

Le genou humain

Étude cinématique  
d'une articulation à  
4-barres

Modèles dynamiques et  
d'impact

Optimisation de  
trajectoire

Problème général

Marche de type 1

Marche de type 2

**Marche de type 3**

Ajout de ressort sur  
l'articulation à 4-barres

Conclusions

## Calcul de l'évolution de $s$ , $\dot{s}$ et $\ddot{s}$ [Chevallereau 2003]

On décrit les trajectoires articulaires en fonction d'une variable de configuration  $s$  :

$$\begin{aligned}\mathbf{q}(s) &= \mathbf{a}_0 + \mathbf{a}_1 s + \mathbf{a}_2 s^2 + \mathbf{a}_3 s^3 + \mathbf{a}_4 s^4 \\ \dot{\mathbf{q}}(s, \dot{s}) &= \frac{\partial \mathbf{q}(s)}{\partial s} \dot{s} \\ \ddot{\mathbf{q}}(s, \dot{s}, \ddot{s}) &= \frac{\partial \mathbf{q}(s)}{\partial s} \ddot{s} + \frac{\partial^2 \mathbf{q}(s)}{\partial s^2} \dot{s}^2\end{aligned}$$

Connaissant l'expression du moment cinétique :

$$\sigma_O = \sum_{i=1}^n m_i \mathbf{v}_i \wedge \mathbf{P}_i + I_i \omega_i \iff \sigma_O(s, \dot{s}) \triangleq I(s) \dot{s}$$

et de sa dérivée :

$$\dot{\sigma}_O(s) = -m g x_g(s) ds$$

On peut obtenir par intégration, l'expression de  $\dot{s}$  et  $\ddot{s}$  connaissant  $\dot{s} |_{s=0}$  :

$$\dot{s} = \frac{\sqrt{I^2(0) \dot{s}^2 |_{s=0} - 2 V(s)}}{I(s)} \quad \text{et} \quad \ddot{s} = \frac{-m g x_g(s) - I(s)^2 \dot{s}^2}{I(s)}$$

# Marche de type 3

Introduction

Le genou humain

Étude cinématique  
d'une articulation à  
4-barres

Modèles dynamiques et  
d'impact

Optimisation de  
trajectoire

Problème général

Marche de type 1

Marche de type 2

Marche de type 3

Ajout de ressort sur  
l'articulation à 4-barres

Conclusions

Simple appui pied à plat : 6 polynômes d'ordre 3

Phase		Marche de type 1		Marche de type 2		Marche de type 3	
		Variables	Paramètres	Variables	Paramètres	Variables	Paramètres
Simple appui	$q(0)$	6	4	6	4		
	$q(T)$						
	$q(T/2)$						
	$\dot{q}(0)$						
	$\dot{q}(T)$						
	$T_{ss}$						
Double appui	$q(0)$			7	5		
	$q(T)$						
	$\dot{q}(0)$						
	$\dot{q}(T)$						
	$R_{2x}$						
	$T_{ds}$						
Simple appui avec rotation	$q(0)$						
	$q(T)$						
	$q(T/2)$						
	$\dot{q}(0)$						
	$\dot{q}(T)$						
	$\dot{s} \big _{s=0}$						
Total		30	16	62	30		

# Marche de type 3

Introduction

Le genou humain

Étude cinématique  
d'une articulation à  
4-barres

Modèles dynamiques et  
d'impact

Optimisation de  
trajectoire

Problème général

Marche de type 1

Marche de type 2

Marche de type 3

Ajout de ressort sur  
l'articulation à 4-barres

Conclusions

Simple appui pied à plat : 6 polynômes d'ordre 3

Phase		Marche de type 1		Marche de type 2		Marche de type 3	
		Variables	Paramètres	Variables	Paramètres	Variables	Paramètres
Simple appui	$q(0)$	6		6		6	
	$q(T)$	6	4	6	4	6	
	$q(T/2)$	6	6	6	6	6	
	$\dot{q}(0)$	6		6		6	
	$\dot{q}(T)$	6	6	6	6	6	
	$T_{ss}$	6	6	6	6	1	
Double appui	$q(0)$			7			
	$q(T)$			7	5		
	$\dot{q}(0)$			7			
	$\dot{q}(T)$			7	5		
	$R_{2x}$			3	3		
$T_{ds}$			1	1			
Simple appui avec rotation	$q(0)$						
	$q(T)$						
	$q(T/2)$						
	$\dot{q}(0)$						
	$\dot{q}(T)$						
	$\dot{s} \big _{s=0}$						
Total		30	16	62	30		

# Marche de type 3

Introduction

Le genou humain

Étude cinématique  
d'une articulation à  
4-barres

Modèles dynamiques et  
d'impact

Optimisation de  
trajectoire

Problème général

Marche de type 1

Marche de type 2

Marche de type 3

Ajout de ressort sur  
l'articulation à 4-barres

Conclusions

Simple appui pied à plat : 6 polynômes d'ordre 3

Double appui : 7 polynômes d'ordre 3

Phase		Marche de type 1		Marche de type 2		Marche de type 3	
		Variables	Paramètres	Variables	Paramètres	Variables	Paramètres
Simple appui	$q(0)$	6		6		6	
	$q(T)$	6	4	6	4	6	
	$q(T/2)$	6	6	6	6	6	
	$\dot{q}(0)$	6		6		6	
	$\dot{q}(T)$	6	6	6	6	6	
	$T_{ss}$	6	6	6	6	1	
Double appui	$q(0)$			7			
	$q(T)$			7	5		
	$\dot{q}(0)$			7			
	$\dot{q}(T)$			7	5		
	$R_{2x}$			3	3		
$T_{ds}$			1	1			
Simple appui avec rotation	$q(0)$						
	$q(T)$						
	$q(T/2)$						
	$\dot{q}(0)$						
	$\dot{q}(T)$						
$\dot{s} \big _{s=0}$							
Total		30	16	62	30		

# Marche de type 3

Introduction

Le genou humain

Étude cinématique  
d'une articulation à  
4-barres

Modèles dynamiques et  
d'impact

Optimisation de  
trajectoire

Problème général

Marche de type 1

Marche de type 2

Marche de type 3

Ajout de ressort sur  
l'articulation à 4-barres

Conclusions

Simple appui pied à plat : 6 polynômes d'ordre 3

Double appui : 7 polynômes d'ordre 3

Phase		Marche de type 1		Marche de type 2		Marche de type 3	
		Variables	Paramètres	Variables	Paramètres	Variables	Paramètres
Simple appui	$q(0)$	6		6		6	
	$q(T)$	6	4	6	4	6	
	$q(T/2)$	6	6	6	6	6	
	$\dot{q}(0)$	6		6		6	
	$\dot{q}(T)$	6	6	6	6	6	
	$T_{ss}$	6	6	6	6	1	
Double appui	$q(0)$			7		7	
	$q(T)$			7	5	7	
	$\dot{q}(0)$			7		7	
	$\dot{q}(T)$			7	5	7	
	$R_{2x}$			3	3	3	
	$T_{ds}$			1	1	1	
Simple appui avec rotation	$q(0)$						
	$q(T)$						
	$q(T/2)$						
	$\dot{q}(0)$						
	$\dot{q}(T)$						
	$\dot{s} \big _{s=0}$						
Total		30	16	62	30		

# Marche de type 3

Introduction

Le genou humain

Étude cinématique  
d'une articulation à  
4-barres

Modèles dynamiques et  
d'impact

Optimisation de  
trajectoire

Problème général

Marche de type 1

Marche de type 2

Marche de type 3

Ajout de ressort sur  
l'articulation à 4-barres

Conclusions

Simple appui pied à plat : 6 polynômes d'ordre 3

Double appui : 7 polynômes d'ordre 3

Simple appui sous-actionné : 7 polynômes d'ordre 4

Phase		Marche de type 1		Marche de type 2		Marche de type 3	
		Variables	Paramètres	Variables	Paramètres	Variables	Paramètres
Simple appui	$q(0)$	6	4	6	4	6	
	$q(T)$						
	$q(T/2)$						
	$\dot{q}(0)$						
	$\dot{q}(T)$						
	$T_{ss}$						
Double appui	$q(0)$			7	5	7	
	$q(T)$						
	$\dot{q}(0)$						
	$\dot{q}(T)$						
	$R_{2x}$						
	$T_{ds}$						
Simple appui avec rotation	$q(0)$						
	$q(T)$						
	$q(T/2)$						
	$\dot{q}(0)$						
	$\dot{q}(T)$						
	$\dot{s} \big _{s=0}$						
Total		30	16	62	30		

# Marche de type 3

Introduction

Le genou humain

Étude cinématique  
d'une articulation à  
4-barres

Modèles dynamiques et  
d'impact

Optimisation de  
trajectoire

Problème général

Marche de type 1

Marche de type 2

Marche de type 3

Ajout de ressort sur  
l'articulation à 4-barres

Conclusions

Simple appui pied à plat : 6 polynômes d'ordre 3

Double appui : 7 polynômes d'ordre 3

Simple appui sous-actionné : 7 polynômes d'ordre 4

Phase		Marche de type 1		Marche de type 2		Marche de type 3	
		Variables	Paramètres	Variables	Paramètres	Variables	Paramètres
Simple appui	$q(0)$	6		6		6	
	$q(T)$	6	4	6	4	6	
	$q(T/2)$	6	6	6	6	6	
	$\dot{q}(0)$	6		6		6	
	$\dot{q}(T)$	6	6	6	6	6	
	$T_{ss}$	6	6	6	6	1	
Double appui	$q(0)$			7		7	
	$q(T)$			7	5	7	
	$\dot{q}(0)$			7		7	
	$\dot{q}(T)$			7	5	7	
	$R_{2x}$			3	3	3	
	$T_{ds}$			1	1	1	
Simple appui avec rotation	$q(0)$					7	
	$q(T)$					7	
	$q(T/2)$					7	
	$\dot{q}(0)$					7	
	$\dot{q}(T)$					7	
	$\dot{s} \big _{s=0}$					1	
Total		30	16	62	30	93	

# Marche de type 3

Introduction

Le genou humain

Étude cinématique  
d'une articulation à  
4-barres

Modèles dynamiques et  
d'impact

Optimisation de  
trajectoire

Problème général

Marche de type 1

Marche de type 2

Marche de type 3

Ajout de ressort sur  
l'articulation à 4-barres

Conclusions

Simple appui pied à plat : 6 polynômes d'ordre 3

Double appui : 7 polynômes d'ordre 3

Simple appui sous-actionné : 7 polynômes d'ordre 4

⇒ Condition de cyclicité et prise en compte du MGI

Phase		Marche de type 1		Marche de type 2		Marche de type 3	
		Variables	Paramètres	Variables	Paramètres	Variables	Paramètres
Simple appui	$q(0)$	6		6		6	
	$q(T)$	6	4	6	4	6	
	$q(T/2)$	6	6	6	6	6	
	$\dot{q}(0)$	6		6		6	
	$\dot{q}(T)$	6	6	6	6	6	
	$T_{ss}$	6	6	6	6	1	
Double appui	$q(0)$			7		7	
	$q(T)$			7	5	7	
	$\dot{q}(0)$			7		7	
	$\dot{q}(T)$			7	5	7	
	$R_{2x}$			3	3	3	
	$T_{ds}$			1	1	1	
Simple appui avec rotation	$q(0)$					7	
	$q(T)$					7	
	$q(T/2)$					7	
	$\dot{q}(0)$					7	
	$\dot{q}(T)$					7	
	$\dot{s} \big _{s=0}$					1	
Total		30	16	62	30	93	



# Marche de type 3

Introduction

Le genou humain

Étude cinématique  
d'une articulation à  
4-barres

Modèles dynamiques et  
d'impact

Optimisation de  
trajectoire

Problème général

Marche de type 1

Marche de type 2

Marche de type 3

Ajout de ressort sur  
l'articulation à 4-barres

Conclusions

Simple appui pied à plat : 6 polynômes d'ordre 3

Double appui : 7 polynômes d'ordre 3

Simple appui sous-actionné : 7 polynômes d'ordre 4

⇒ Condition de cyclicité et prise en compte du MGI

Phase		Marche de type 1		Marche de type 2		Marche de type 3	
		Variables	Paramètres	Variables	Paramètres	Variables	Paramètres
Simple appui	$q(0)$	6		6		6	
	$q(T)$	6	4	6	4	6	6
	$q(T/2)$	6	6	6	6	6	
	$\dot{q}(0)$	6		6		6	
	$\dot{q}(T)$	6	6	6	6	6	6
	$T_{ss}$	6	6	6	6	1	1
Double appui	$q(0)$			7		7	
	$q(T)$			7	5	7	5
	$\dot{q}(0)$			7		7	
	$\dot{q}(T)$			7	5	7	5
	$R_{2x}$			3	3	3	3
	$T_{ds}$			1	1	1	1
Simple appui avec rotation	$q(0)$					7	
	$q(T)$					7	5
	$q(T/2)$					7	7
	$\dot{q}(0)$					7	
	$\dot{q}(T)$					7	7
	$\dot{s} \big _{s=0}$					1	1
Total		30	16	62	30	93	47

Introduction

Le genou humain

Étude cinématique  
d'une articulation à  
4-barres

Modèles dynamiques et  
d'impact

Optimisation de  
trajectoire

Problème général

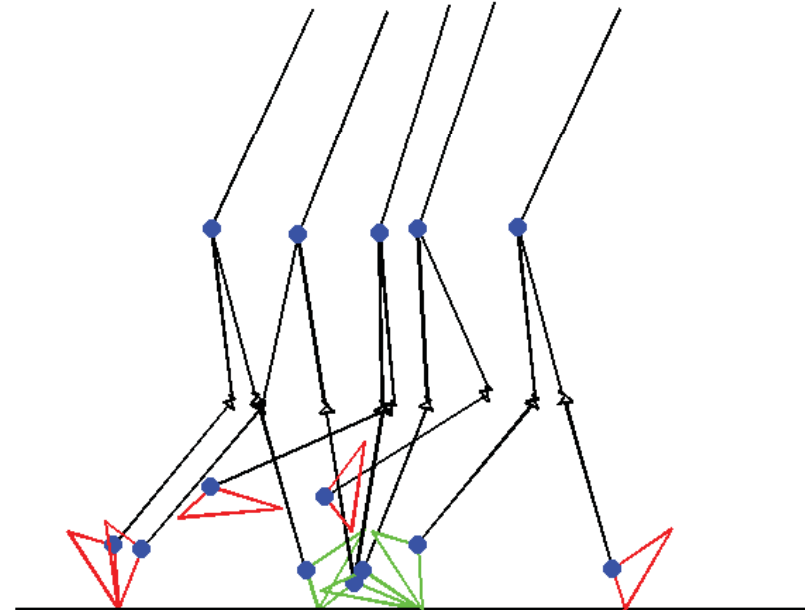
Marche de type 1

Marche de type 2

**Marche de type 3**

Ajout de ressort sur  
l'articulation à 4-barres

Conclusions



## Résultats

- Difficultés de convergence de l'algorithme.
- Contraintes sur les vitesses articulaires difficiles à respecter.

# Ajout de ressort sur l'articulation à 4-barres

Introduction

Le genou humain

Étude cinématique  
d'une articulation à  
4-barres

Modèles dynamiques et  
d'impact

Optimisation de  
trajectoire

Problème général

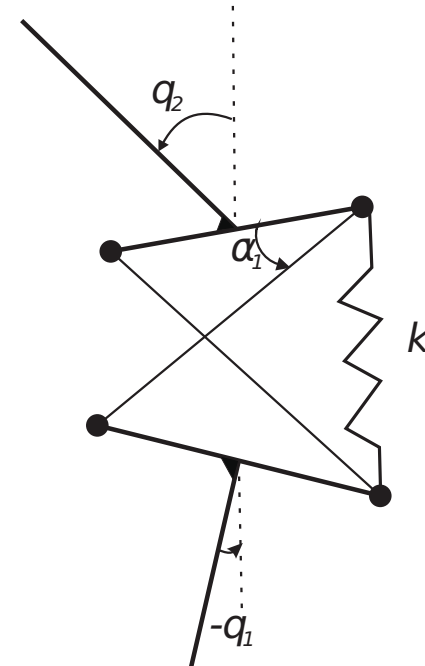
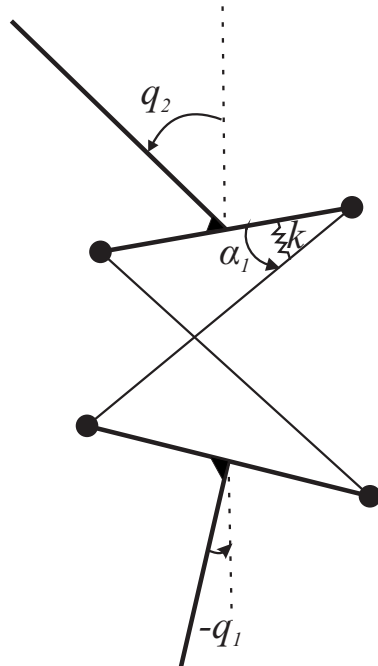
Marche de type 1

Marche de type 2

Marche de type 3

Ajout de ressort sur  
l'articulation à 4-barres

Conclusions



On ajoute un ressort en parallèle sur chaque articulation de genou. Deux cas de ressorts sont considérés, en torsion et en extension. On réalise de nouvelles optimisations pour des trajectoires de type 1 (simple appui + impact).

# Ajout de ressort sur l'articulation à 4-barres

Introduction

Le genou humain

Étude cinématique  
d'une articulation à  
4-barres

Modèles dynamiques et  
d'impact

Optimisation de  
trajectoire

Problème général

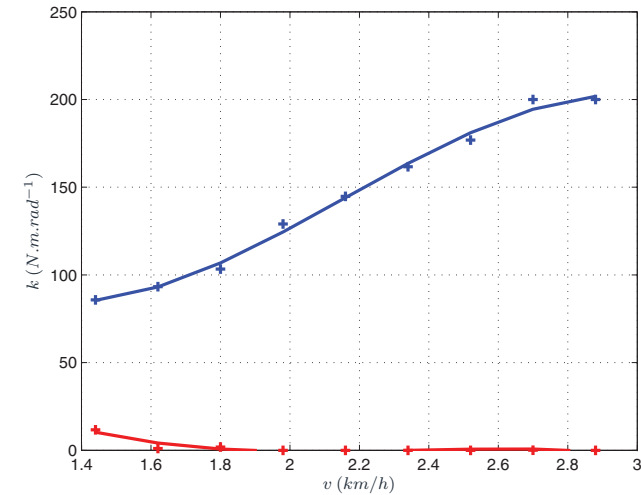
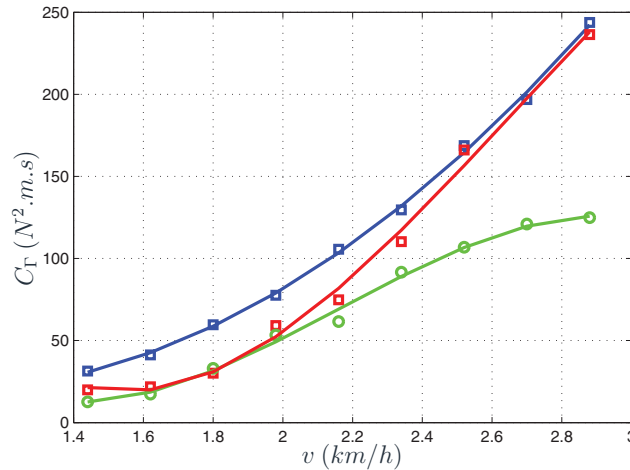
Marche de type 1

Marche de type 2

Marche de type 3

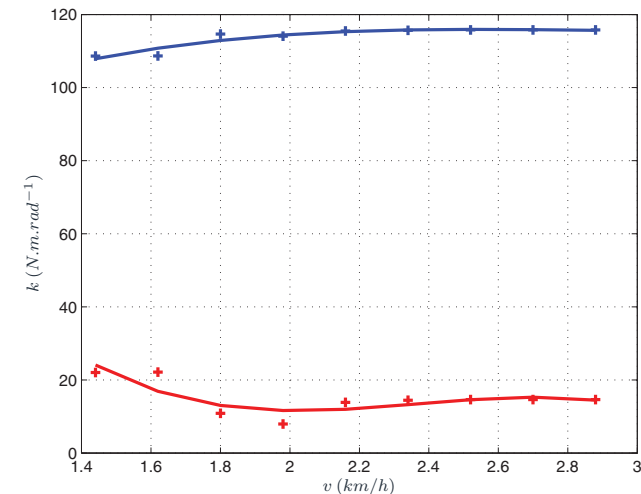
Ajout de ressort sur  
l'articulation à 4-barres

Conclusions



## Résultats

- Réduction de la consommation d'énergie avec les ressorts.
- Coefficient de raideur pour la jambe libre faible.
- Coefficient de raideur du ressort en extension pour la jambe de support constant en fonction de la vitesse.



# Ajout de ressort sur l'articulation à 4-barres

Introduction

Le genou humain

Étude cinématique  
d'une articulation à  
4-barres

Modèles dynamiques et  
d'impact

Optimisation de  
trajectoire

Problème général

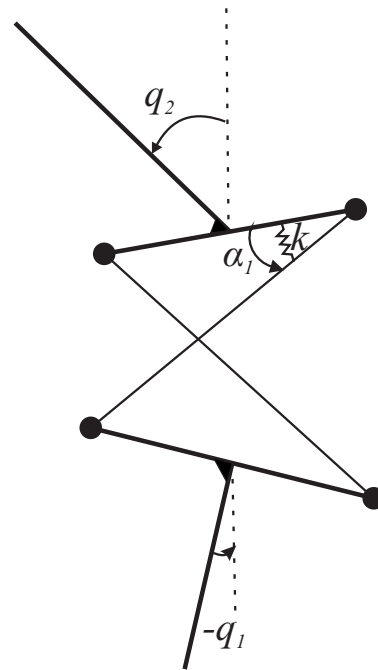
Marche de type 1

Marche de type 2

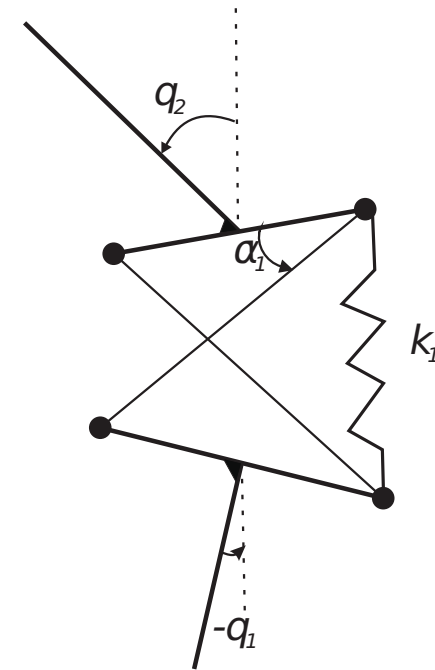
Marche de type 3

Ajout de ressort sur  
l'articulation à 4-barres

Conclusions



Ressort en torsion



Ressort en extension

[Hamon, Aoustin, CLAWAR 2011], [Hamon, Aoustin, ECCOMAS 2011]

Introduction

---

Le genou humain

---

Étude cinématique  
d'une articulation à  
4-barres

---

Modèles dynamiques et  
d'impact

---

Optimisation de  
trajectoire

---

**Conclusions**

---

Conclusions

Perspectives

# Conclusions

Introduction

Le genou humain

Étude cinématique  
d'une articulation à  
4-barres

Modèles dynamiques et  
d'impact

Optimisation de  
trajectoire

Conclusions

Conclusions

Perspectives

- Proposition d'un mécanisme susceptible de reproduire le mouvement du genou humain basé sur une articulation parallèle.
- Étude cinématique de cette articulation et mise en évidence des singularités.
- Définition de modèles dynamiques permettant la réalisation de trajectoires de marche complexe.
- Méthode d'optimisation pour générer trois types de trajectoires de marche.
- Comparaison des performances d'un robot bipède plan utilisant des genoux de type pivot et des genoux de type 4-barres.
- Mise en évidence de la possibilité d'obtenir une phase de double appui précédée par un impact en assurant uniquement le contact sur la pointe du pied arrière.

Introduction

Le genou humain

Étude cinématique  
d'une articulation à  
4-barres

Modèles dynamiques et  
d'impact

Optimisation de  
trajectoire

Conclusions

Conclusions

Perspectives

- Sur l'ensemble des trajectoires générées de type 1 et 2, le robot utilisant des genoux 4-barres consomme moins d'énergie qu'un robot classique.
- L'articulation à 4-barres engendre une répartition des couples articulaires différente de celle observé dans le cas d'un robot classique.
- Pour les trajectoires de type 2, la phase de double appui joue un rôle de phase de propulsion dans le cas de l'utilisation de genoux 4-barres.
- Génération de trajectoire avec rotation sous actionnée du pied d'appui avec des genoux à 4-barres.
- Amélioration des performances du genou 4-barres par l'ajout de ressort en parallèle de l'actionneur.



Introduction

---

Le genou humain

---

Étude cinématique  
d'une articulation à  
4-barres

---

Modèles dynamiques et  
d'impact

---

Optimisation de  
trajectoire

---

Conclusions

---

Conclusions

Perspectives

- Extension de ce travail au cas 3D.
- Mise en place de trajectoires de marche comportant une phase de rotation du pied autour des orteils actionnés.
- Étude de mouvements différents tels que la course, la phase de démarrage ou la phase d'arrêt avec un robot à genoux 4-barres.
- Mesure du mouvement du genou et dimensionnement de l'articulation à 4-barres pour suivre le plus précisément possible le mouvement humain.

Introduction

---

Le genou humain

---

Étude cinématique  
d'une articulation à  
4-barres

---

Modèles dynamiques et  
d'impact

---

Optimisation de  
trajectoire

---

Conclusions

---

Conclusions

Perspectives

Merci de votre attention.