

# Génération de la marche du robot HYDROïD à partir de ses modèles géométriques inverses

1

S. Bertrand, O. Bruneau, S. Alfayad et F.B. Ouezdou



**Laboratoire d'Ingénierie des Systèmes de Versailles**  
**Equipe Robotique Humanoïde**

Présentation JNRH 2010

# Introduction

2

- Objectif :

- Nouvelle méthode de contrôle
  - ✦ Algorithme de contrôle
  - ✦ Stratégie de contrôle
  - ✦ Modèle analytique du robot (MGD-MGI)

- Intérêts :

- Des modèles analytiques (MGI)
  - ✦ Précision
  - ✦ Fiabilité
  - ✦ liens articulaires/opérationnel
- De la stratégie de contrôle
  - ✦ 3 aspects
    - Capteurs
    - Structure
    - Planification
      - Centre du bassin
      - CdG du robot
  - ✦ Comportement système/orteil

# Introduction

3

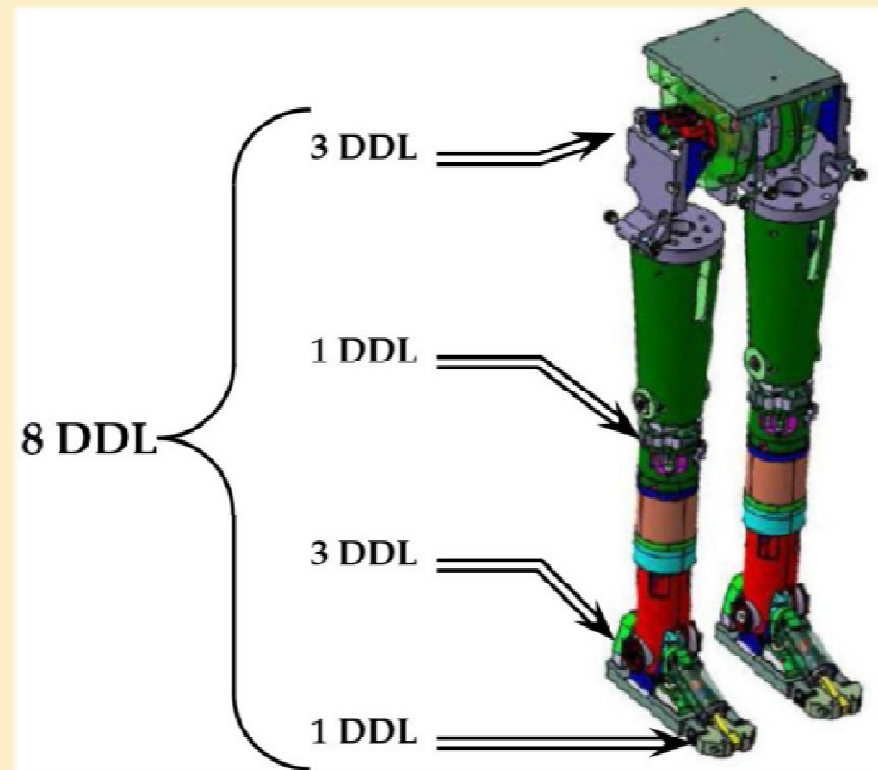
- **Plan**
  - Introduction
  - Etablissement MGD-MGI
  - Algorithme de contrôle
  - Résultats
  - Conclusions & Perspectives

# Introduction

4

- **HYDROïD [1] :**

- Pour « HYDRauleic humanOID »
  - ✦ Actionneurs hydrauliques
- Robot bipède anthropomorphe
- Pieds articulés actifs
- Robot complet
  - ✦ Taille : 1m60
  - ✦ Poids : 58 kg
- Partie inférieure :
  - ✦ 16 DDL actifs (rotoïdes)
  - ✦ Taille : 1m
  - ✦ Poids : 27 kg



# Etablissement MGD-MGI

5

- Généralités
- MGD-MGI d'HYDROïD
- Difficultés et résolutions
- Solutions MGI 6 DDL
- Solutions MGI 7 DDL
- Validation

# Généralités

6

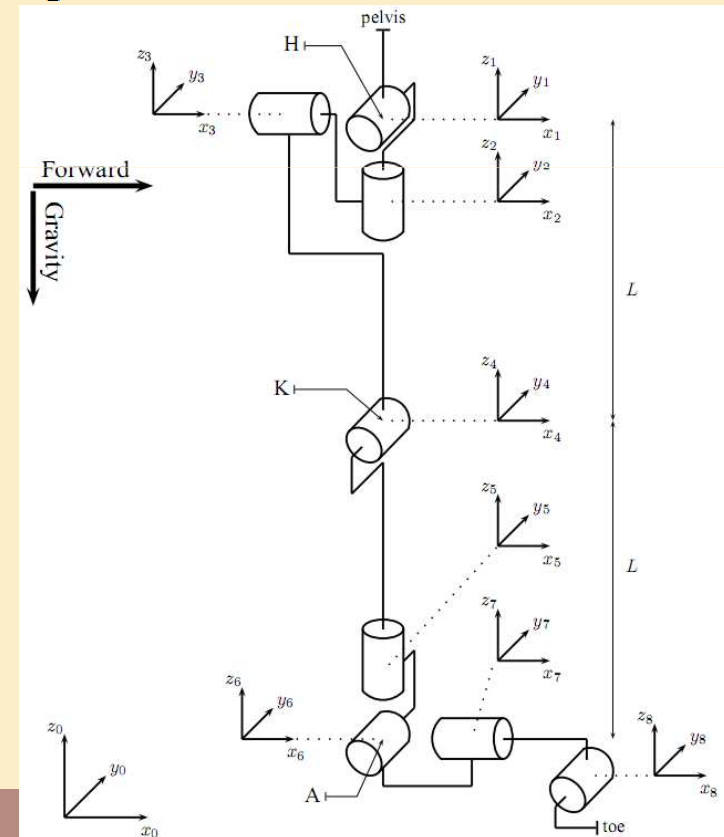
- MGD

$$U = \prod_{i=1}^n T^{i-1,i}(q_i) = T^{0n}(\vec{q}) = f(\vec{q})$$

- MGI

$$\vec{q} = f^{-1}(U)$$

$$U = \begin{bmatrix} sx & nx & ax & x \\ sy & ny & ay & y \\ sz & nz & az & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \vec{q} = \begin{bmatrix} q_1 \\ \vdots \\ q_i \\ \vdots \\ q_N \end{bmatrix}$$

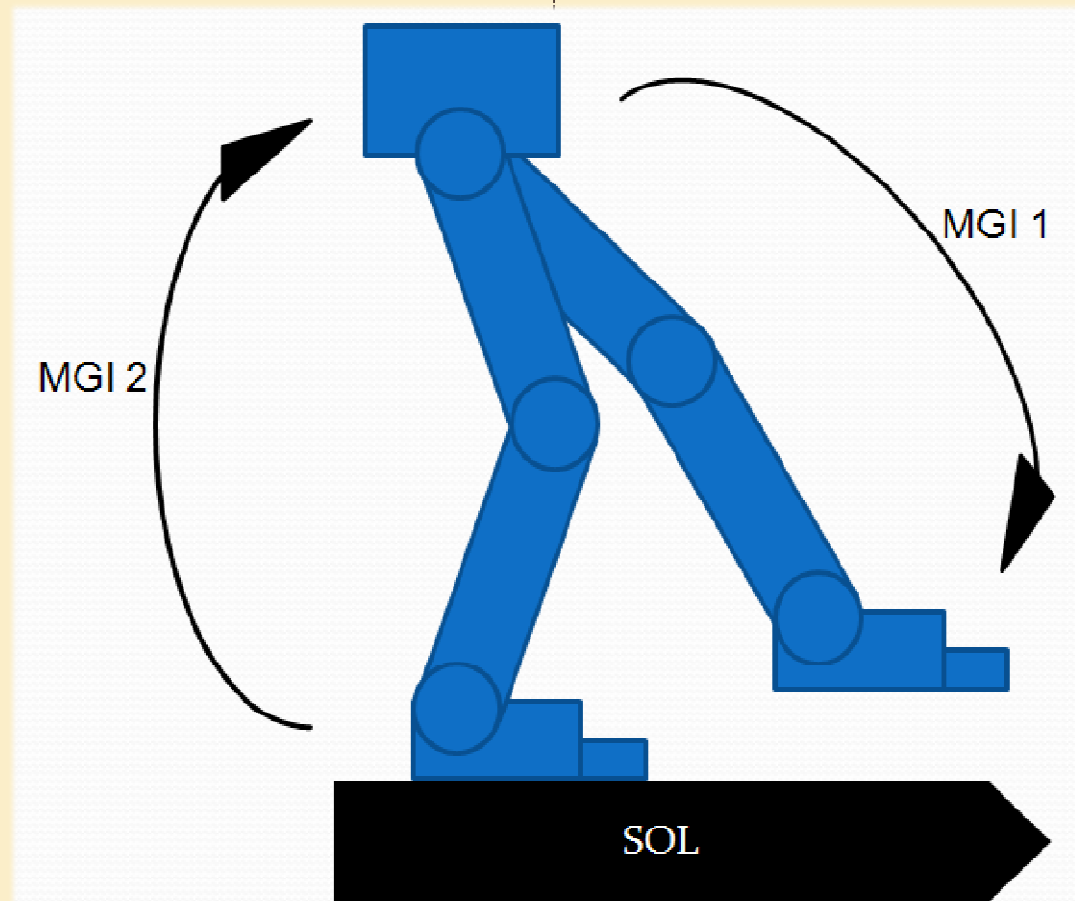


# MGD-MGI d'HYDROïD

7

- MGD1 et MGI1

- MGD2 et MGI2

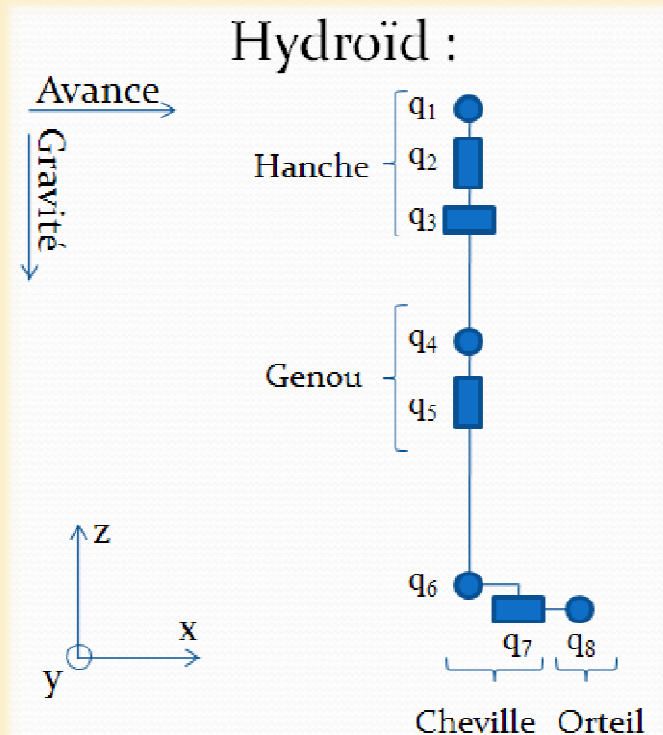


# Difficultés et Résolutions

8

## • Difficultés

- 7 DDL + 1 DDL (orteil)
- $q_1$ ,  $q_4$  et  $q_6$  non successifs



## • Résolutions

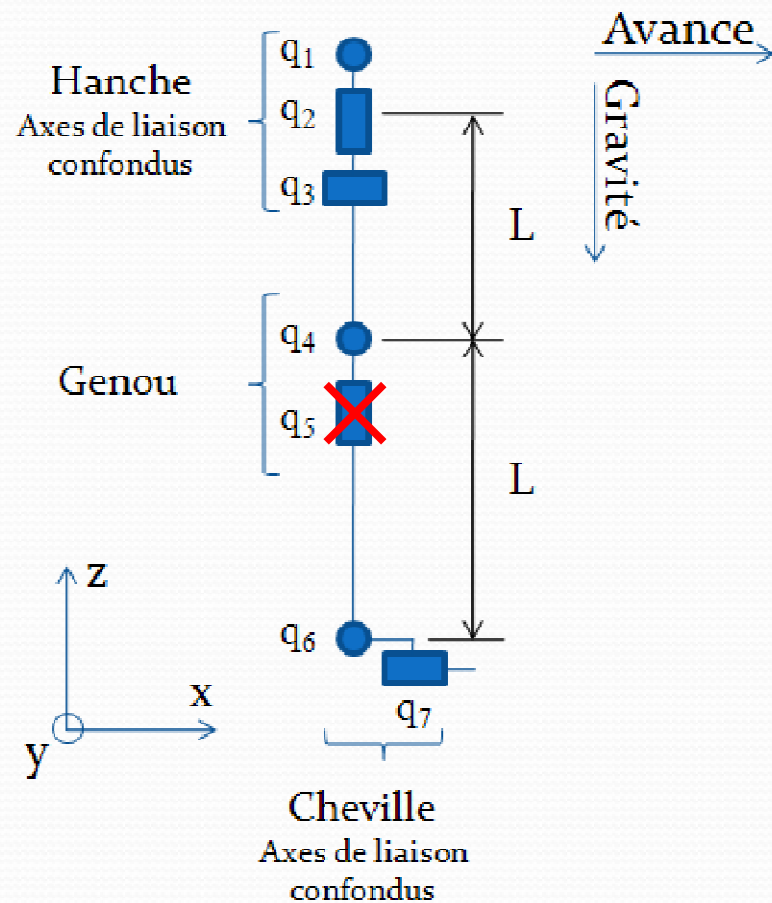
- Redondance
  - ✦ Considérer un DDL comme connu
    - $q_2$  pour le MGI1<sub>R</sub>
    - $q_5$  pour le MGI2<sub>R</sub>
- $q_1$ ,  $q_4$  et  $q_6$  non successifs
  - ✦ MGI à 6 DDL
    - Les MGI1<sub>A</sub> et MGI2<sub>A</sub> n'utilisant pas  $q_5$
    - Les MGI1<sub>B</sub> et MGI2<sub>B</sub> n'utilisant pas  $q_2$



# Etablissement MGI 6 DDL

9

- Le MGI2<sub>A</sub>
  - Orientation-position du bassin par rapport au pied en contact
  - $q_5$  non utilisé
  - Découplage orientation-position possible
    - ✦ Position  $\rightarrow q_7, q_6$  et  $q_4$
    - ✦ Orientation  $\rightarrow q_3, q_2$  et  $q_1$



# Etablissement MGI 6 DDL

10

## • Le MGI2<sub>A</sub>

### ○ Solution

$$q_4 = \arctan \left( \frac{\sqrt{4 \cdot L^4 - (x^2 + y^2 + z^2 - 2 \cdot L^2)^2}}{x^2 + y^2 + z^2 - 2 \cdot L^2} \right)$$

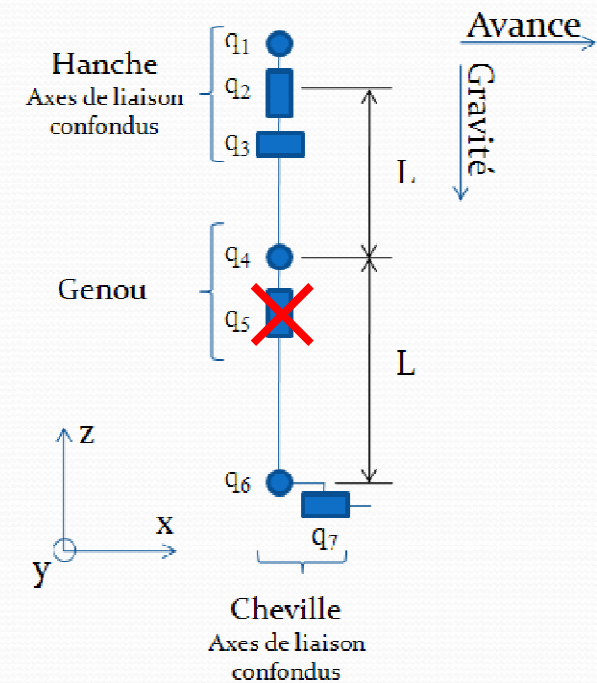
$$q_7 = \arctan \left( \frac{y}{z} \right)$$

$$q_6 = \arctan \left( \frac{C_7 \cdot (C_4 + 1) \cdot x + S_4 \cdot z}{S_4 \cdot C_7 \cdot x - (C_4 + 1) \cdot z} \right)$$

$$q_3 = \arctan \left( \frac{S_{46} \cdot nx - C_{46} \cdot (S_7 \cdot ny + C_7 \cdot nz)}{C_7 \cdot ny - S_7 \cdot nz} \right)$$

$$q_2 = \arctan \left( C_3 \cdot \frac{C_{46} \cdot nx + S_{46} \cdot (S_7 \cdot ny + C_7 \cdot nz)}{C_7 \cdot ny - S_7 \cdot nz} \right)$$

$$q_1 = -\arctan \left( \frac{C_{46} \cdot ax + S_{46} \cdot (S_7 \cdot ay + C_7 \cdot az)}{C_{46} \cdot sx + S_{46} \cdot (S_7 \cdot sy + C_7 \cdot sz)} \right)$$

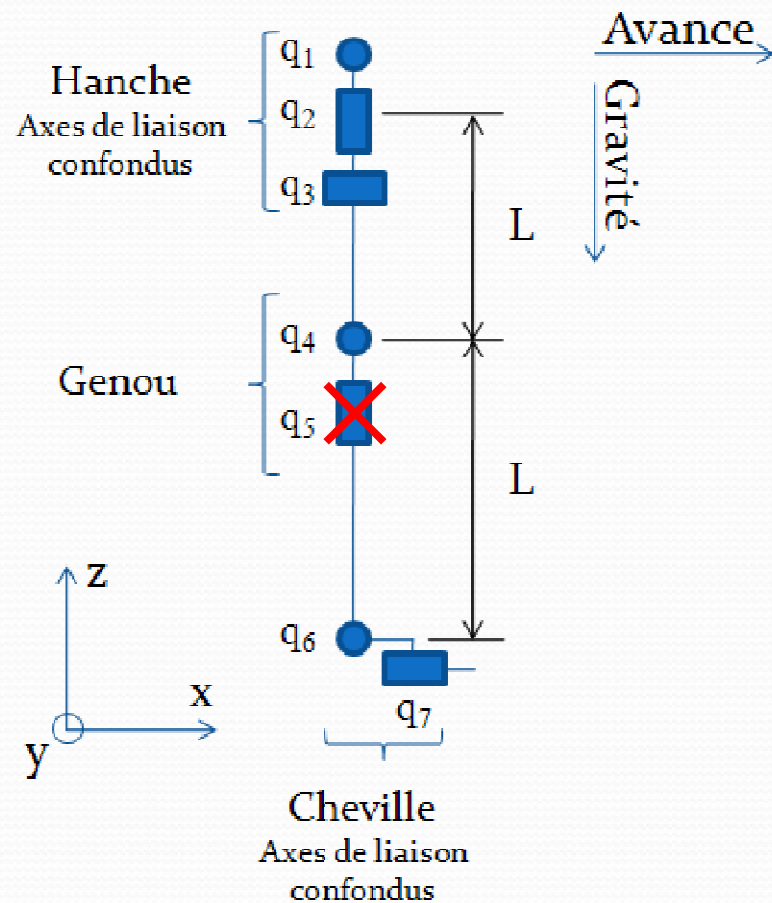


$$U = \begin{bmatrix} sx & nx & ax & x \\ sy & ny & ay & y \\ sz & nz & az & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

# Etablissement MGI 6 DDL

11

- Le MGI1<sub>A</sub>
  - Orientation-position du pied en transfert par rapport au bassin
  - $q_5$  non utilisé
  - Découplage orientation-position impossible
    - ✦ Position  $\rightarrow q_1, q_3$  et  $q_4$
    - ✦ Orientation  $\rightarrow \mathbf{q_2}, q_6$  et  $q_7$



# Etablissement MGI 6 DDL

12

## • Le MGI1<sub>A</sub>

### ○ Modèle intermédiaire : Robian

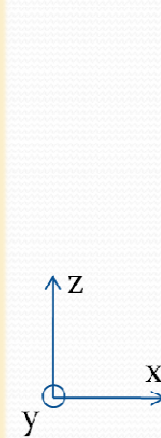
$$\star M_{13}(q_1, q_2, q_3) = M_{ac}(q_a, q_b, q_c)$$

### ○ Solution

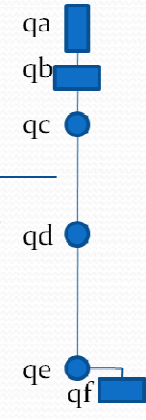
$$\begin{cases} q_a = \arctan\left(\frac{y \cdot sz - z \cdot sy}{x \cdot sz - z \cdot sx}\right) \\ q_b = \arctan\left(\frac{S_a \cdot x - C_a \cdot y}{z}\right) \\ q_c = \arctan\left(\frac{(C_c \cdot x + S_a \cdot y) \cdot (C_d + 1) \cdot L - \frac{z}{C_b} \cdot L \cdot S_d}{\frac{z}{C_b} \cdot (C_d + 1) \cdot L - (C_a \cdot x + S_a \cdot y) \cdot L \cdot S_d}\right) \\ q_d = q_4 \end{cases}$$

$$\begin{cases} q_1 = \arctan\left(\frac{C_b \cdot S_c}{C_a \cdot C_c - S_a \cdot S_b \cdot S_c}\right) \\ q_2 = \arctan\left(C_1 \cdot \frac{S_a \cdot C_c + C_a \cdot S_b \cdot S_c}{C_a \cdot C_c - S_a \cdot S_b \cdot S_c}\right) \\ q_3 = \arctan\left(\frac{C_a \cdot S_b \cdot C_c - S_a \cdot S_c}{C_a \cdot C_b}\right) \end{cases}$$

Hydroïd :



Robian :



Même  
orientation  
↑  
Même  
configuration

$$U = \begin{bmatrix} sx & nx & ax & x \\ sy & ny & ay & y \\ sz & nz & az & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

# Etablissement MGI 6 DDL

13

## • Le MGI1<sub>A</sub>

### ○ Solution

$$q_4 = \arctan\left(\frac{\sqrt{4.L^4 - (x^2 + y^2 + z^2 - 2.L^2)^2}}{x^2 + y^2 + z^2 - 2.L^2}\right)$$

$$q_1 = \arctan\left(\frac{(1 + C_4).(x.B + y.C) - \text{signe}(B).S_4.D.z}{(1 + C_4).(y.A + z.B) + \text{signe}(B).S_4.D.x}\right)$$

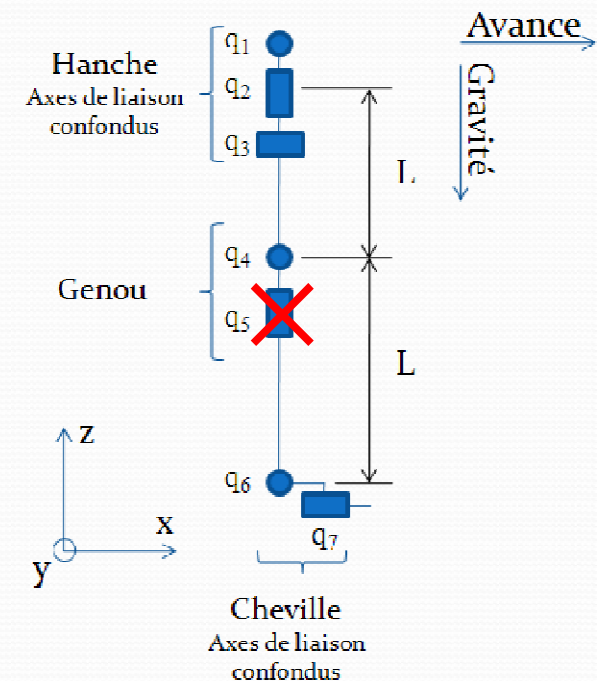
$$q_2 = \arctan\left(\frac{C_1.C - S_1.A}{B}\right)$$

$$q_3 = \arctan\left(\frac{S_2.(C_1.x - S_1.z) - C_2.y}{S_1.x + C_1.z}\right)$$

$$q_6 = -q_4 - \arctan\left(\frac{S_1.sx + C_1.sz}{C_3.(S_2.sy + C_2.(C_1.sx - S_1.sz))}\right)$$

$$q_7 = -\arctan\left(\frac{C_3.(S_2.(C_1.ax - S_1.az) - C_2.ay) - S_3.(S_1.ax + C_1.az)}{C_3.(S_2.(C_1.nx - S_1.nz) - C_2.ny) - S_3.(S_1.nx + C_1.nz)}\right)$$

$$\begin{cases} A = x.sy - y.sx \\ B = x.sz - z.sx \\ C = y.sz - z.sy \end{cases} \quad D = \sqrt{A^2 + B^2 + C^2}$$



$$U = \begin{bmatrix} sx & nx & ax & x \\ sy & ny & ay & y \\ sz & nz & az & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

# Etablissement MGI 7 DDL

14

- **Résolution de la redondance**
  - Connaissance d'un DDL
    - ✦  $q_2$  pour le  $MGI1_R$
    - ✦  $q_5$  pour le  $MGI2_R$
- **Conséquences**
  - Résolution proche MGI 6 DDL
  - Élimination des problèmes précédents
  - Gérer la redondance de différentes manières
    - ✦ S'éloigner des butées articulaires pour les DDL à faible débattement
    - ✦ Suivant un critère (ex : consommation énergétique)
    - ✦ S'inspirer de la marche humaine

# Etablissement MGI 7 DDL

15

## • Le MGI1

### ○ Solution

$$q_4 = \arctan\left(\frac{\sqrt{4.L^4 - (x^2 + y^2 + z^2 - 2.L^2)^2}}{x^2 + y^2 + z^2 - 2.L^2}\right)$$

$$q_1 = -\arctan\left(\frac{z.(S_2.y + S_4.L) - x.\sqrt{C_2^2.(x^2 + z^2) - (S_2.y + S_4.L)^2}}{x.(S_2.y + S_4.L) + z.\sqrt{C_2^2.(x^2 + z^2) - (S_2.y + S_4.L)^2}}\right)$$

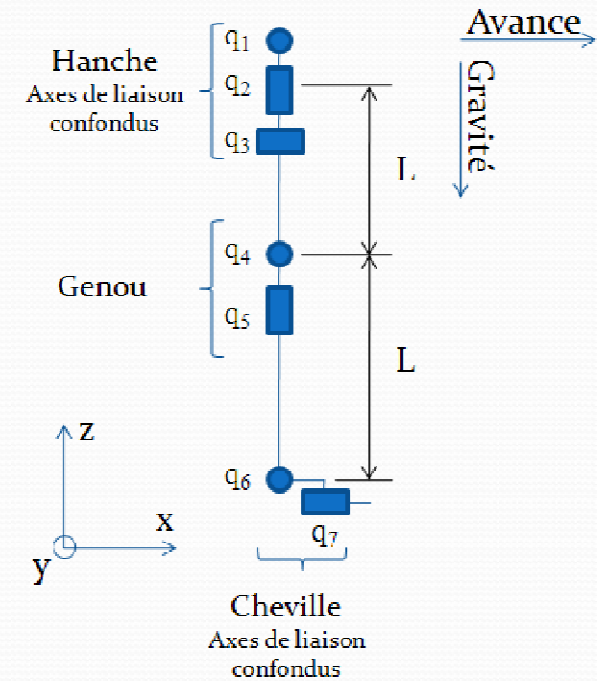
$$q_3 = \arctan\left(\frac{S_2.(C_1.x - S_1.z) - C_2.y}{S_1.x + C_1.z}\right)$$

$$q_5 = \arctan\left(\frac{C_3.(S_2.G - C_2.sy) - S_3.F}{S_4.(C_3.F + S_3.(S_2.G - C_2.sy)) - C_4.(C_2.G + S_2.sy)}\right)$$

$$q_6 = \arctan\left(C_5 \cdot \frac{C_4.(C_3.F + S_3.(S_2.G - C_2.sy)) + S_4.(C_2.G + S_2.sy)}{S_4.(C_3.F + S_3.(S_2.G - C_2.sy)) - C_4.(C_2.G + S_2.sy)}\right)$$

$$q_7 = \arctan\left(\frac{C_4.(S_3.(S_2.I - C_2.ny) + C_3.H) + S_4.(C_2.I + S_2.ny)}{C_4.(S_3.(S_2.K - C_2.ay) + C_3.J) + S_4.(C_2.K + S_2.ay)}\right)$$

$$\begin{cases} F = S_1.sx + C_1.sz & G = C_1.sx - S_1.sz \\ H = S_1.nx + C_1.nz & I = C_1.nx - S_1.nz \\ J = S_1.ax + C_1.az & K = C_1.ax - S_1.az \end{cases}$$



$$U = \begin{bmatrix} sx & nx & ax & x \\ sy & ny & ay & y \\ sz & nz & az & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

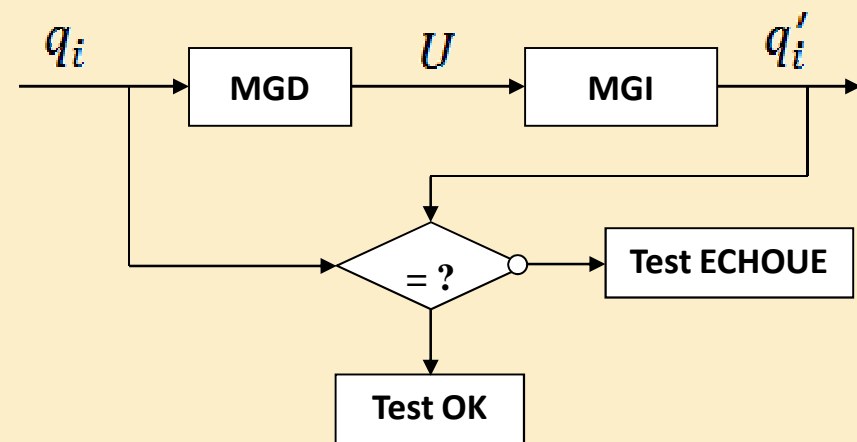
# Validation

16

- Visuelle : Webots
  - Test MGD + MGI
  - Erreurs évidentes

- Balayage exhaustif du domaine opérationnel accessible : Matlab

- MGD  $\rightarrow U = f(\vec{q})$
- MGI  $\rightarrow \vec{q} = f^{-1}(U)$
- $q_{i_{min}} \leq q_i \leq q_{i_{max}}$
- Egalité si :  $|q_i - q'_i| < 10^{-5} rad$





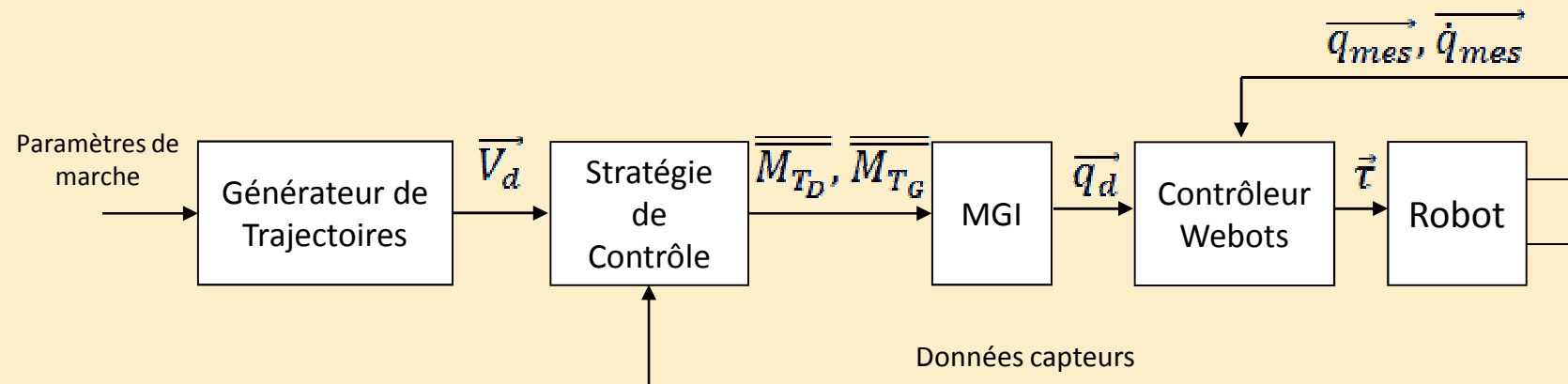
# Algorithme de contrôle

17

- **Synopsis**
- **Stratégie de contrôle**

# Synopsis

18



- $\overrightarrow{V_d}$  : Trajectoires désirées
- $\overline{\overline{M_{TD}}}, \overline{\overline{M_{TG}}}$  : Matrices tâches jambe droite, jambe gauche
- $\overrightarrow{q_d}$  : Configuration articulaire
- $\vec{\tau}$  : Couples articulaires
- $\overrightarrow{q_{mes}}, \overrightarrow{\dot{q}_{mes}}$  : Retours capteurs

# Stratégie de contrôle [2]

19

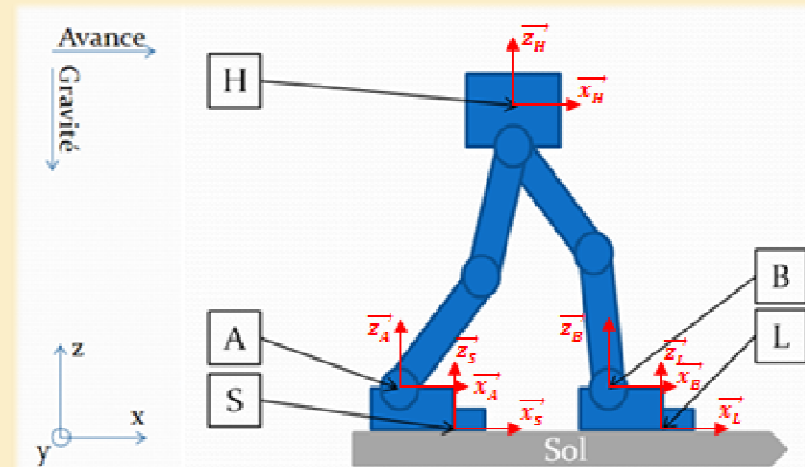
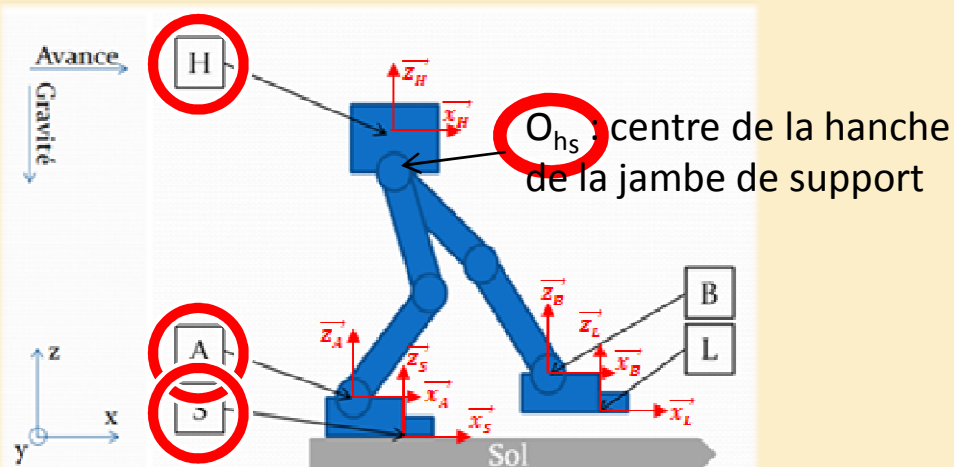
- Génération de trajectoires dans l'espace opérationnel :

- Jambe de support

$$\overline{M}_{in}^{AO_{hs}} = \overline{M}_{mes}^{AH} \overline{M}_{mes}^{HS} \overline{M}_d^{SH} \overline{M}_{struct}^{HO_{hs}}$$

- Jambe en transfert

$$\overline{M}_{in}^{O_{ht}B} = \overline{M}_{struct}^{O_{ht}H} * \overline{M}_{mes}^{HS} * \overline{M}_d^{SL} * \overline{M}_{mes}^{LB}$$



[2] Bruneau O., Gravez F., Ouezdou F.B., Planning approach and local reactivity for 3D operational space control of 3D bipedal robots with flexible feet, International Conference on Intelligent Robots and Systems, 1: 3037-3042, 2009

# Stratégie de contrôle [2]

20

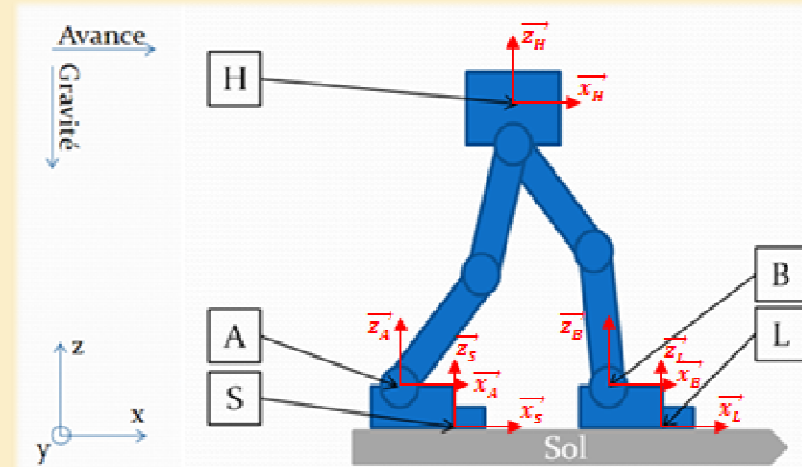
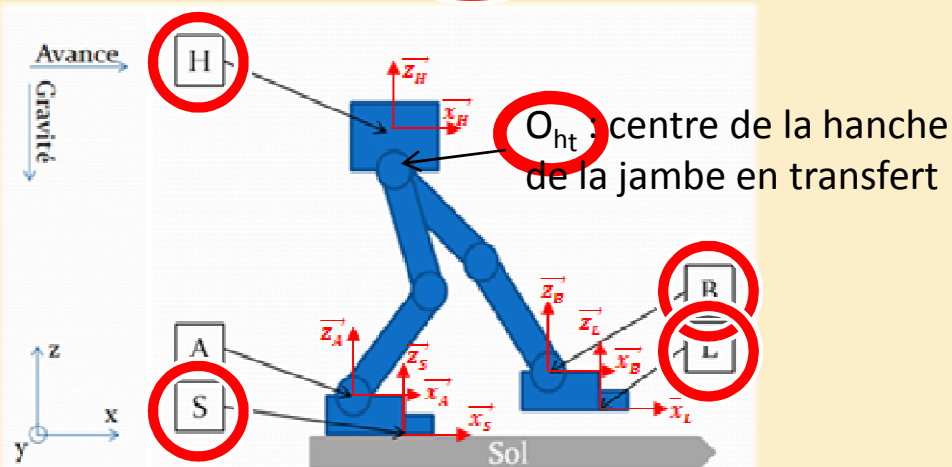
- Génération de trajectoires dans l'espace opérationnel :

- Jambe de support

$$\overline{M}_{in}^{AO_{hs}} = \overline{M}_{mes}^{AH} * \overline{M}_{mes}^{HS} * \overline{M}_d^{SH} * \overline{M}_{struct}^{HO_{hs}}$$

- Jambe en transfert

$$\overline{M}_{in}^{O_{ht}B}, \overline{M}_{struct}^{O_{ht}H}, \overline{M}_{mes}^{HS}, \overline{M}_d^{SL}, \overline{M}_{mes}^{LB}$$



[2] Bruneau O., Gravez F., Ouezdou F.B., Planning approach and local reactivity for 3D operational space control of 3D bipedal robots with flexible feet, International Conference on Intelligent Robots and Systems, 1: 3037-3042, 2009

# Stratégie de contrôle [2]

21

- $\overline{\overline{M_{mes}^{HS}}}$ ,  $\overline{\overline{M_{mes}^{AH}}}$  et  $\overline{\overline{M_{mes}^{LB}}}$

- $\overline{\overline{M_{mes}^{AH}}}$  et  $\overline{\overline{M_{mes}^{LB}}}$

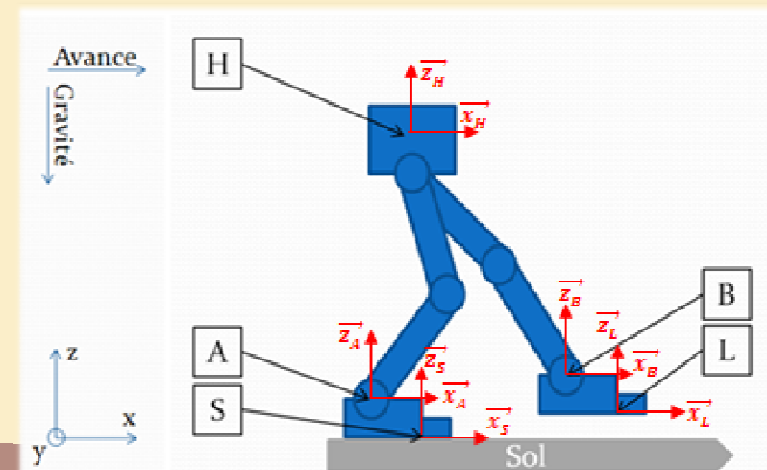
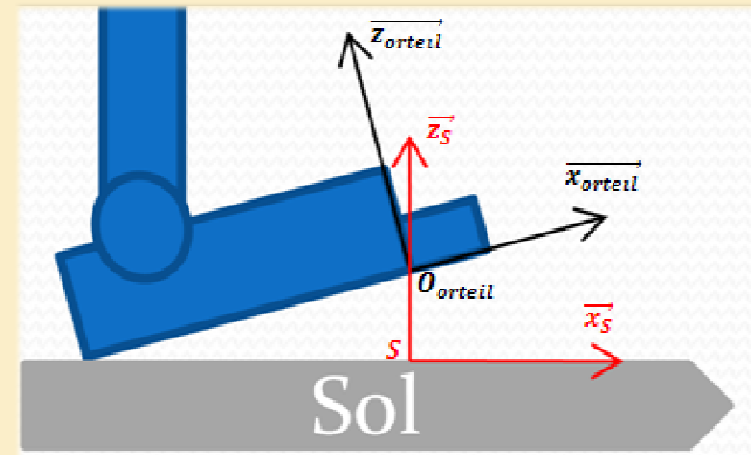
- ✦ Issues du MGD :

- Données des capteurs articulaires

- $\overline{\overline{M_{mes}^{HS}}}$

- ✦ Issue d'un gyroscope et d'un accéléromètre

- $S = Proj_{o_{orteil}} \text{ et } S \in Sol$



# Résultats

22

## Génération de marches :

- **Contrôle du centre du bassin :**
  - 6 DDL par jambe
  - 6 DDL + 1 DDL (orteil) par jambe
  - 7 DDL + 1 DDL (orteil) par jambe
- **Contrôle du CdG du robot :**
  - 7 DDL + 1 DDL (orteil) par jambe

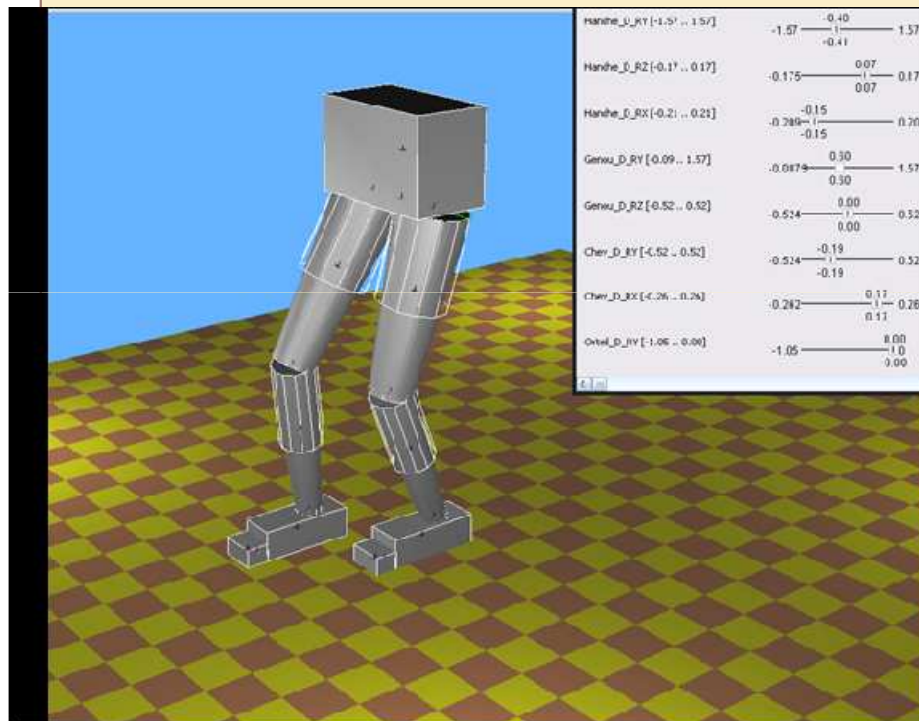
# Résultats:

## Génération de marches (contrôle du centre du bassin)

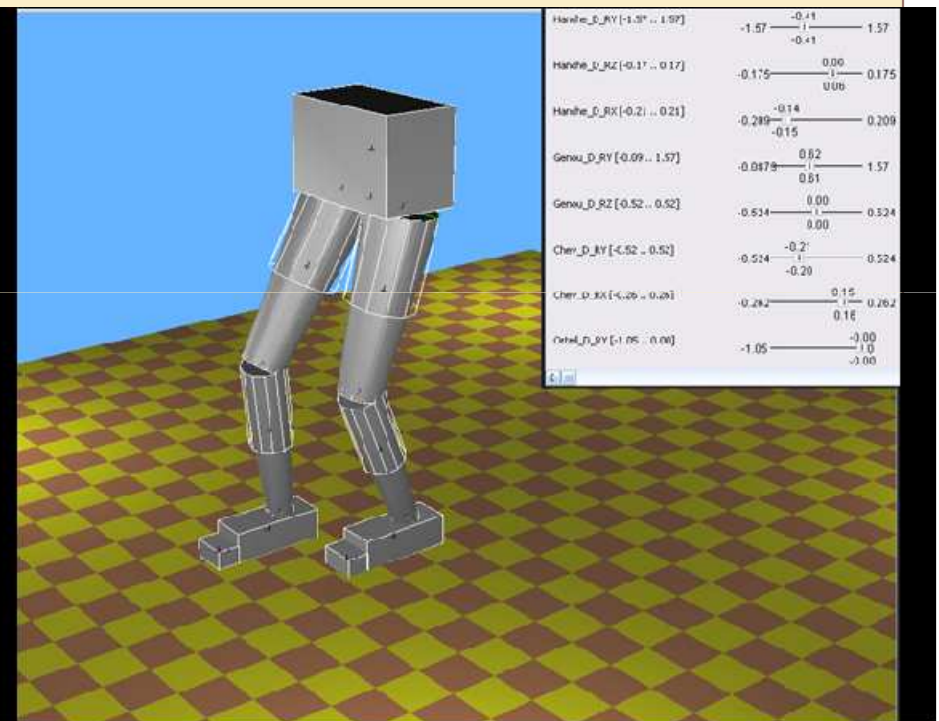
23

- Pied à plat (6 DDL)

- Flexion de l'orteil (7 DDL)



6 DDL.avi



7 DDL.avi

# Résultats:

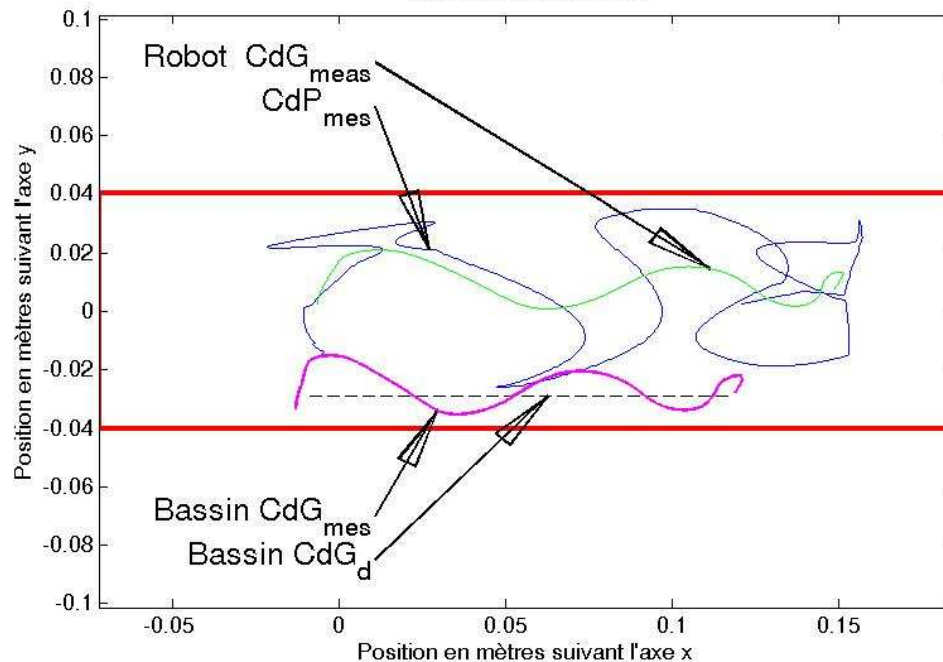
## Génération de marches (contrôle du centre du bassin)

24

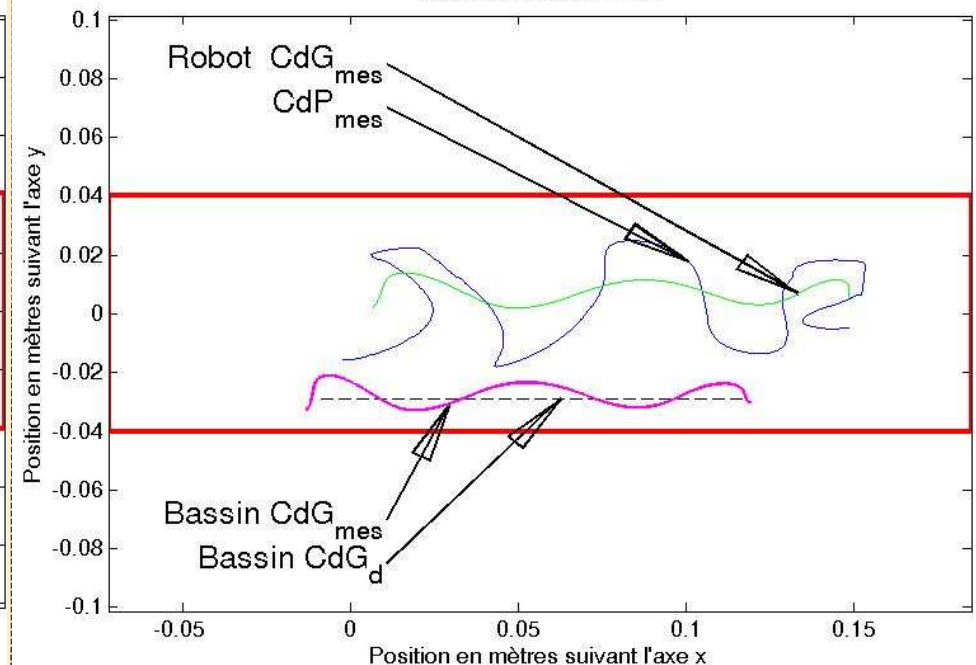
- Pied à plat (6 DDL)

- Flexion de l'orteil (7 DDL)

Evolutions du CdP et du CdG du bassin durant une phase de simple support  
Sens de la marche ---->



Evolutions du CdP et du CdG du bassin durant une phase de simple support  
Sens de la marche ---->





# Résultats:

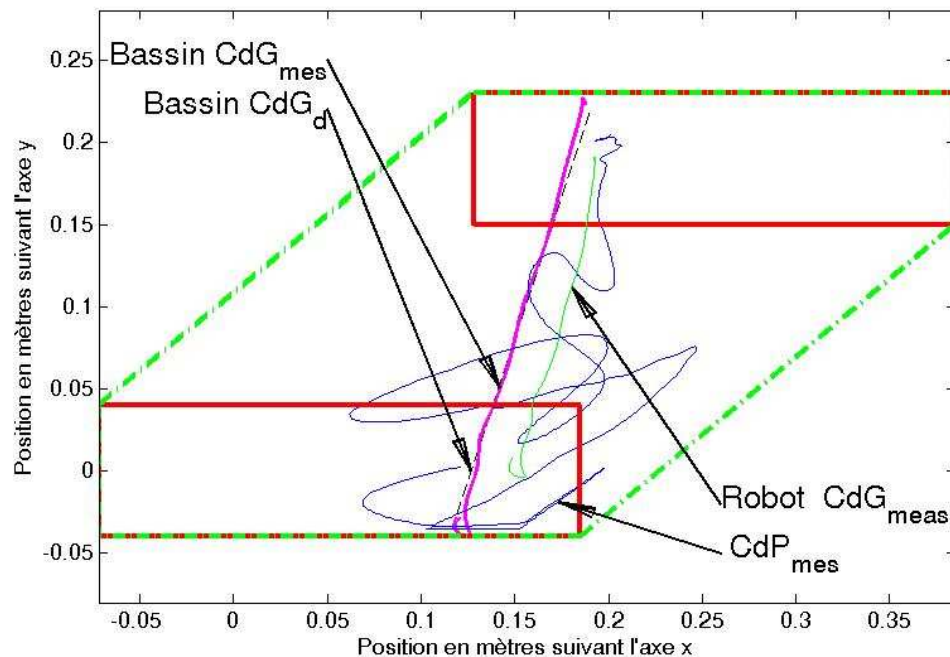
## Génération de marches (contrôle du centre du bassin)

25

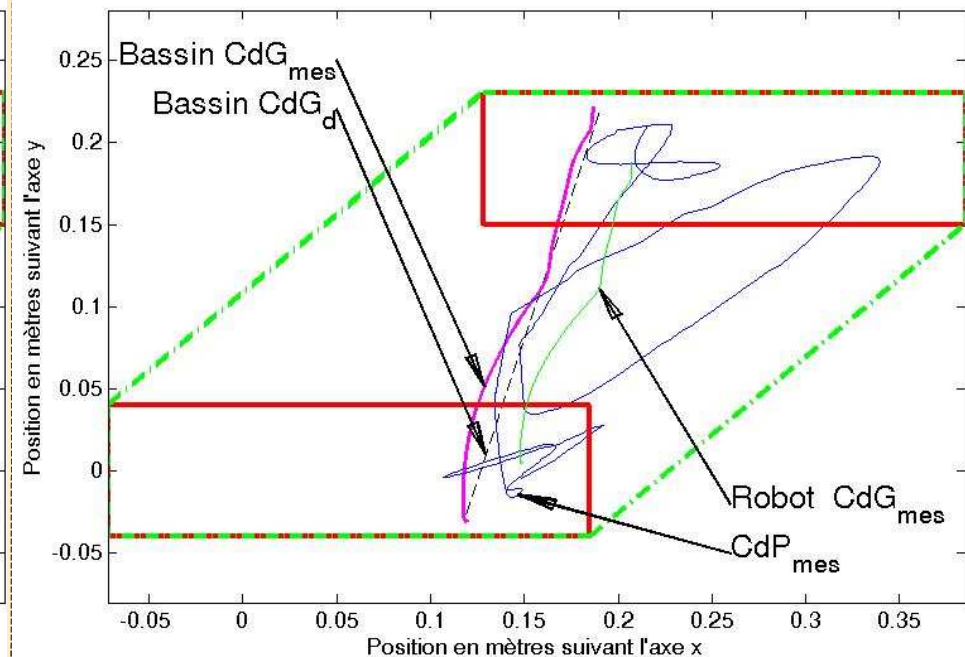
- Pied à plat (6 DDL)

- Flexion de l'orteil (7 DDL)

Evolutions du CdP et du CdG du bassin durant une phase de double support  
Sens de la marche ---->



Evolutions du CdP et du CdG du bassin durant une phase de double support  
Sens de la marche ---->

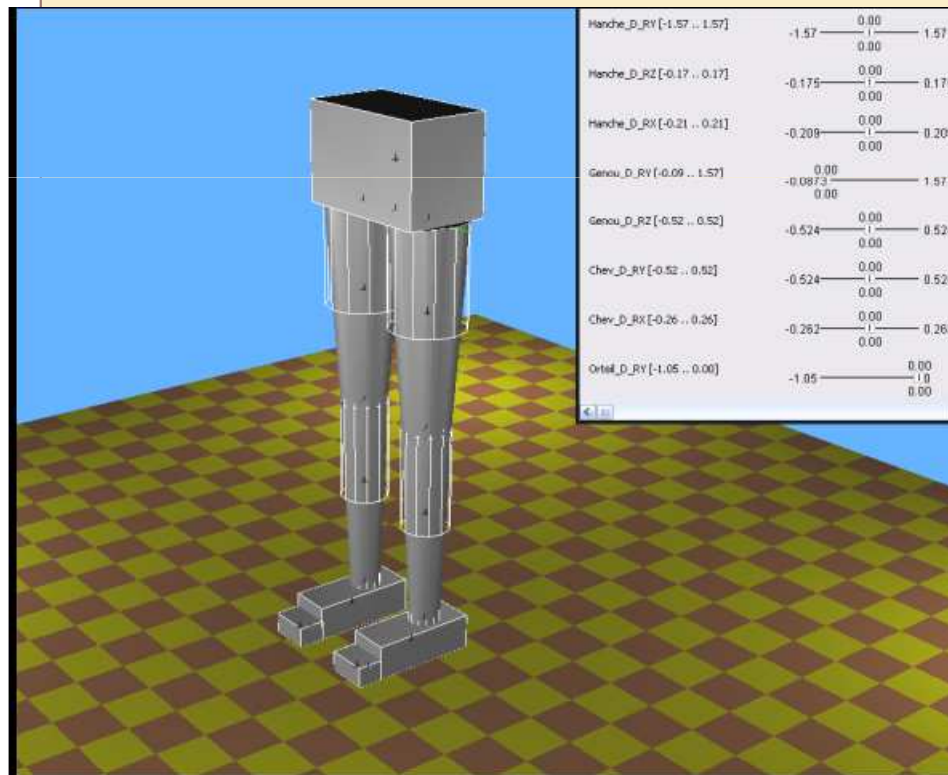


# Résultats: Génération de marches

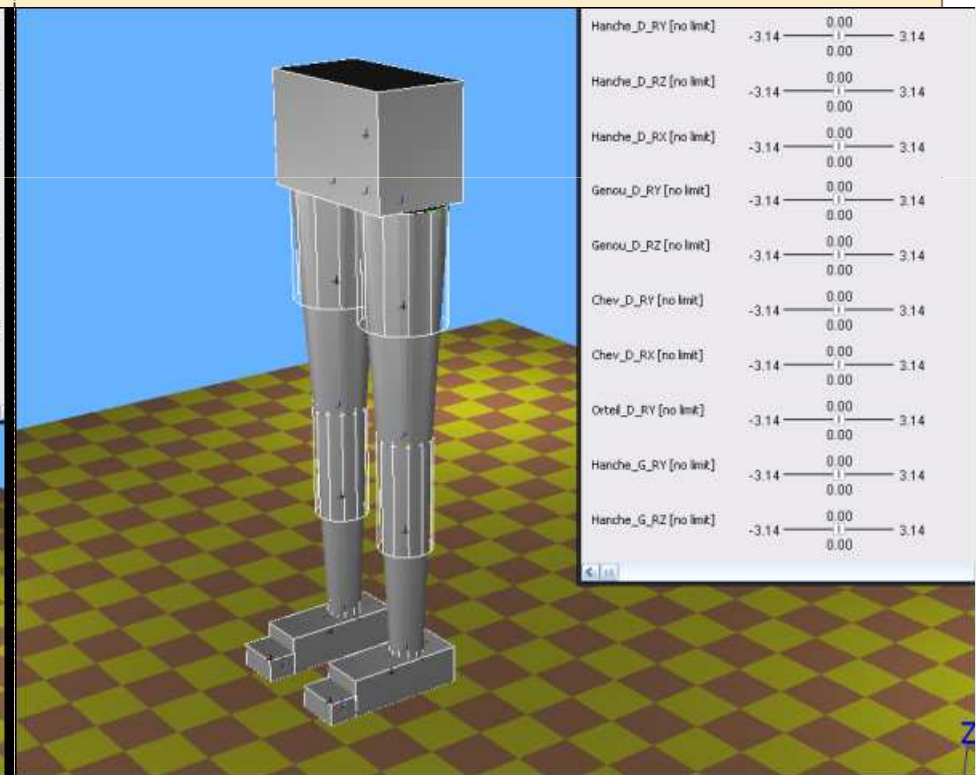
26

- Redondance + Flexion de l'orteil (7 DDL + 1DDL), contrôle du centre du bassin

- Redondance + Flexion de l'orteil (7 DDL + 1DDL), contrôle du CdG du robot



8 DDL.avi



Contrôle\_CdG.avi

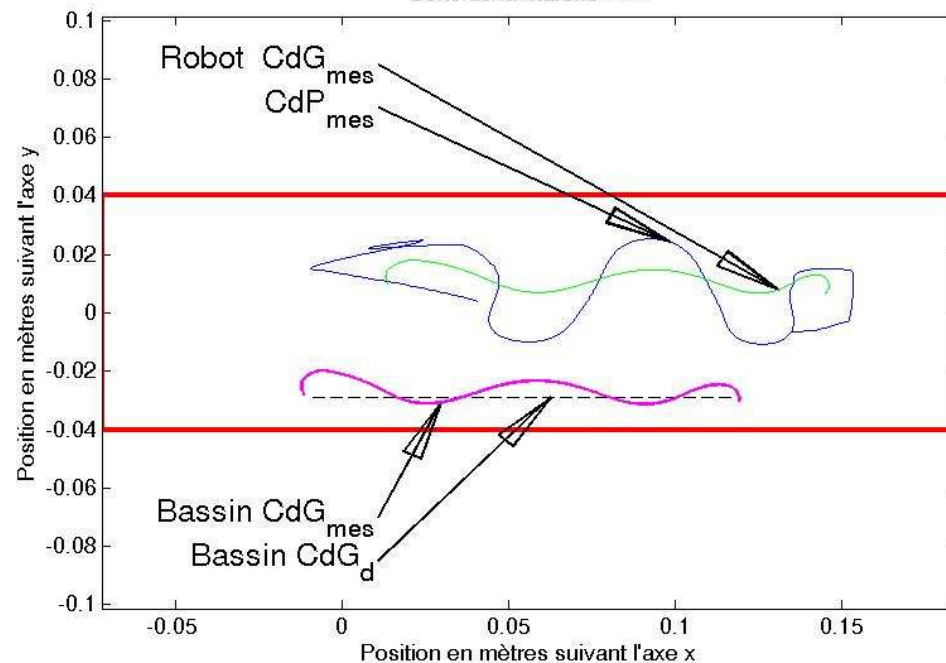
# Résultats: Génération de marches

27

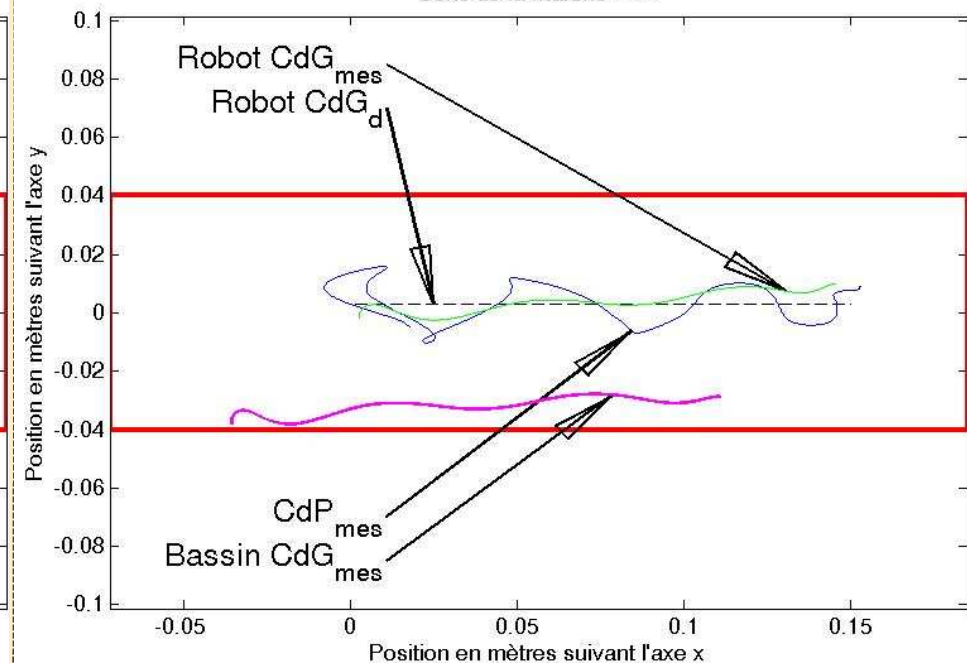
- 7 DDL + 1 DDL (centre du bassin)

- 7 DDL + 1 DDL (CdG du robot)

Evolutions du CdP et du CdG du bassin durant une phase de simple support  
Sens de la marche ---->



Evolutions du CdP et du CdG du bassin durant une phase de simple support  
Sens de la marche ---->



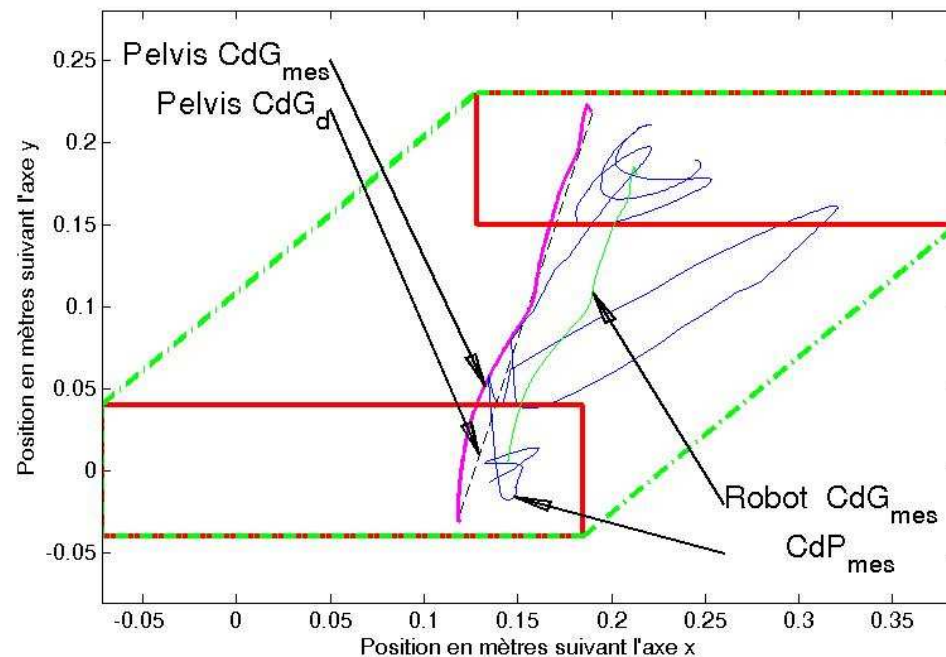
# Résultats: Génération de marches

28

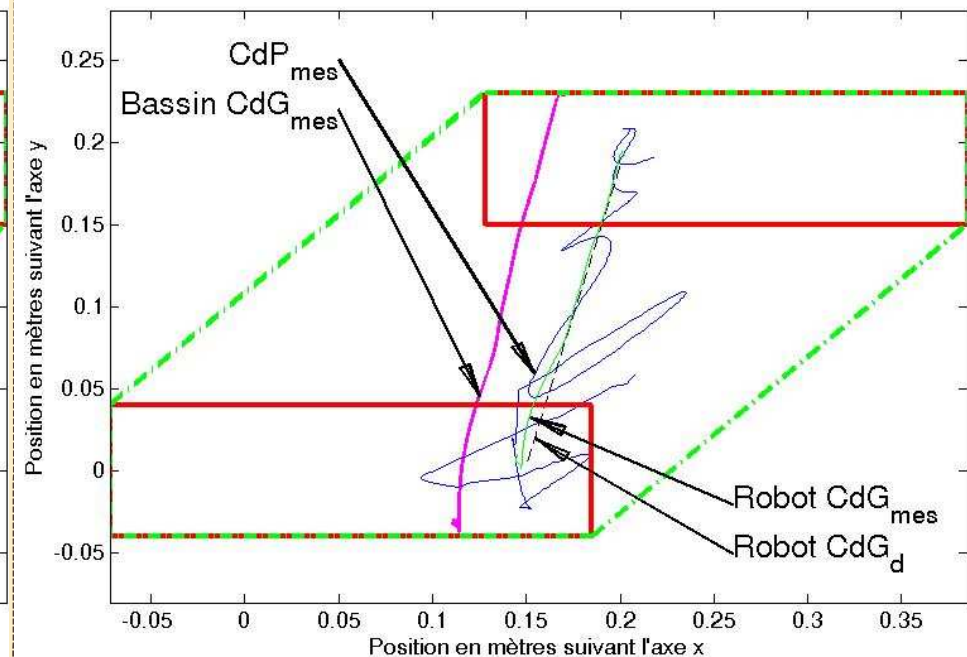
- 7 DDL + 1 DDL (centre du bassin)

- 7 DDL + 1 DDL (CdG du robot)

Evolutions du CdP et du CdG du bassin durant une phase de double support  
Sens de la marche ---->



Evolutions du CdP et du CdG du bassin durant une phase de double support  
Sens de la marche ---->



# Conclusions

29

- MGI-MGD robot bipède 16 DDL
  - Résolution
  - Validation
- Implémentation stratégie de contrôle
  - Simulations concluantes
  - Marche utilisant les 8 DDL par jambe d'HYDROÏD
    - ✦ Mise en valeur de l'intérêt de la redondance
- Améliorations nécessaires
  - Améliorer la robustesse de la marche
  - S'inspirer de la marche humaine (redondance)



# Perspectives

30

- Autre approche de la redondance
  - Critères d'optimisation
  - Cinématique et Jacobienne augmentée
- Intégrer critères :
  - Equilibre dynamique
  - Approche Energétique

# Contraintes imposées

31

- Expressions :  $q_i = \arctan(\dots)$
- Compactes
- Ordonnées
  - MGI1  $\rightarrow q_1, \dots, q_7$
  - MGI2  $\rightarrow q_7, \dots, q_1$
- Respect orientation/position