Robot humanoïde HYDROïD : Actionnement, Structure Cinématique et Stratégie de contrôle

Samer ALFAYAD

9-11-2010

sfayad@hotmail.fr

Plan de l'exposé

- Parcours Professionnel
- Contexte & Objectifs du travail
- Contributions
  - Structures cinématiques
  - Actionnement
  - Stratégie de commande
- Conclusions

Curriculum Vitae : Résumé

2011 Post-doctorant

TUM /Institute for Cognitive Systems

Superviseur: Pr. Gordon Cheng

Sujet : Force control for humanoid robot actuation

2010 Post-doctorant

UVSQ /LISV

Superviseur: Pr. F.B.Ouezdou

Sujet : Modélisation, conception de structures hybrides dédiées à la partie supérieure d'un Robot Humanoïde

2005-2009 Thèse

UVSQ /LISV

Directeur: Pr. F.B.Ouezdou

Sujet : Robot humanoïde HYDROïD : Actionnement, Structure Cinématique et Stratégie de contrôle

2005 Master de Recherche: Mécanique et Ingénierie des Systèmes, ENSAM/P6

2001-2004 Enseignant l'ISSAT (Syrie)

1999-2000 Diplôme d'Ingénieur ISSAT (Syrie)

Spécialité: Mecatronique - Major de la Promotion

Bibliographie

Thèse soutenue en nov. 2009

Sujet : Robot humanoïde HYDROïD : Actionnement, Structure Cinématique et Stratégie de contrôle

Mention : Très Honorable et Félicitations du Jury

Jury : F.B.Ouezdou, F.Pierrot (R), C.Gosselin(R), Buehler(R),C.Chevallereau(P), G.Cheng,O.Bruneau & F.Namoun.

Brevets Internationaux (5)

- WO2009118366, WO2009135694,WO2009144320, WO2009147243,EP2010056125

- Europe, USA, Canada, Chine, Japon

Brevets déposés (2) en cours de validation.

Articles dans des revues internationales (2) - Sensors and Actuators A : Physical, 2010, Part I & Part II

Articles sousmis dans des revues internationales (2)

- Journal of Mechanical Design, ASME

- Theory of Machines & Mechanisms

Articles en préparation (2)

Articles conférences (5) : ICRA, 3 IROS, 1 Humanoids

Contexte du travail

Projet collaboratif: Robot Humanoïde

- LISV & BIA
- PHEMA: 2006-2009

Buts:

- Compréhension de la Locomotion & Manipulation
- Santé-Handicap: banc de test pour les prothèses

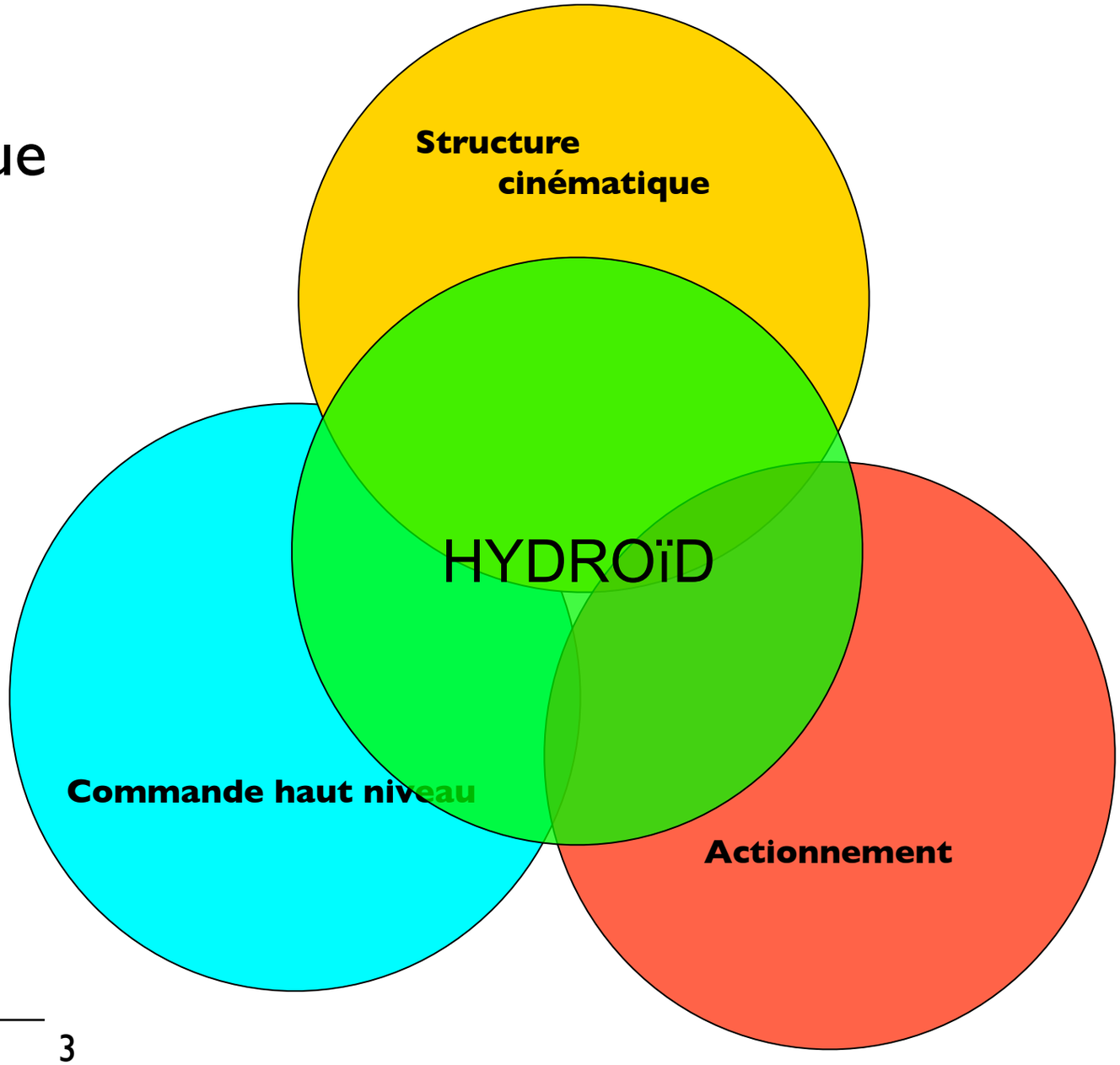
Caractéristiques: un adolescent de 14 ans

- Taille: 1,6 m
- Masse: 50 kg
- Vitesse: 1,2 m /s

Objectifs

- Robot HUMANOÏDE: ressemble à l'homme
  - Morphologie anthropomorphique
  - Allure des mouvements
  - Sécurité dans l'interaction
  - Consommation énergétique

- Problématiques
  - Structure cinématique?
  - Type d'actionnement?
  - Commande haut niveau?

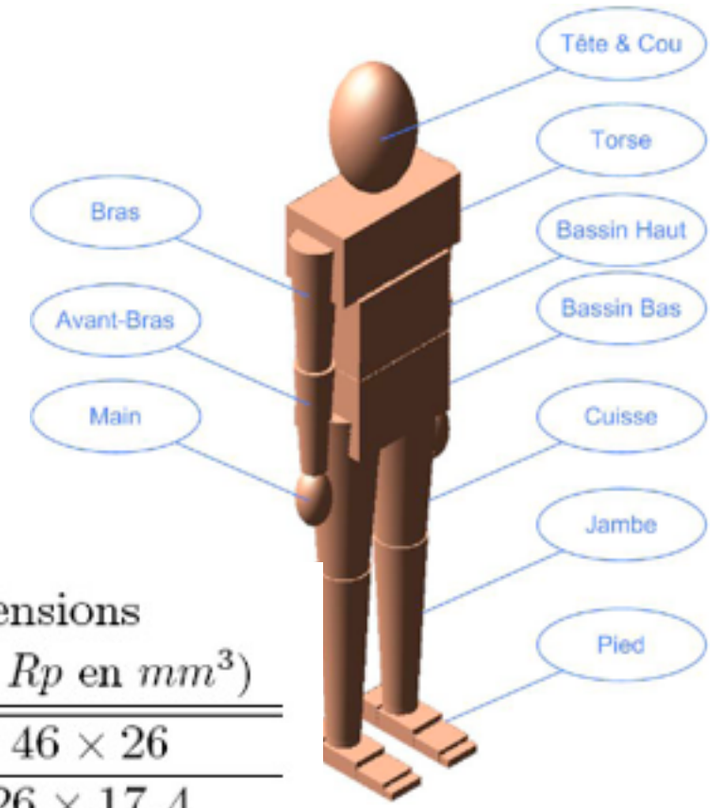


Structure Cinématique

Espace disponible ?

- Masse 50 Kg
- Taille 1,6m

→ **Hanavan** →

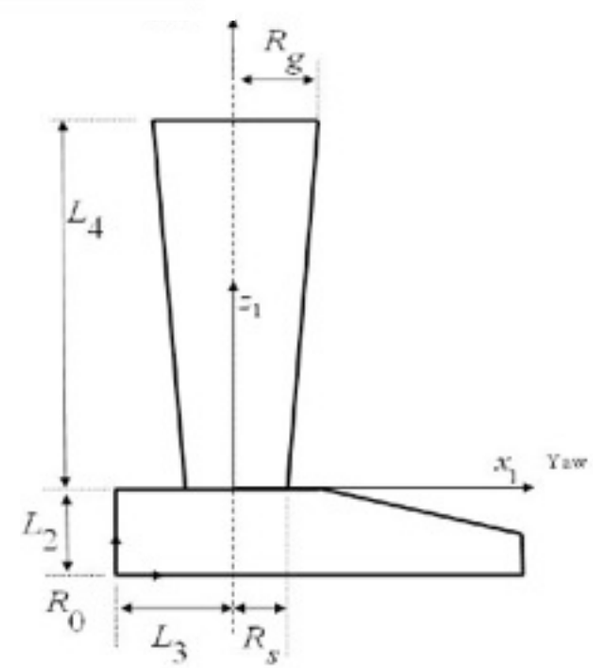


Corps	masse (Kg)	dimensions ($L \times l \times h$ en mm^3)
Torse	$8,49$	$148,8 \times 164,8 \times 297,7$
Bassin Haut	$8,24$	$160 \times 189 \times 250$
Bassin Bas	$8,24$	$160 \times 189 \times 290$
Pied	$0,833$	$257 \times 68 \times 80$

Parallélépipèdes rectangulaires

Corps	masse	dimensions ($L \times R_g \times Rp$ en mm^3)
Bras	$1,3$	$293 \times 46 \times 26$
Avant-Bras	$0,85$	$293 \times 26 \times 17,4$
Cuisse	$5,025$	$392 \times 73,25 \times 46$
Jambe	$2,188$	$392 \times 46,6 \times 29,5$

Cônes tronqués



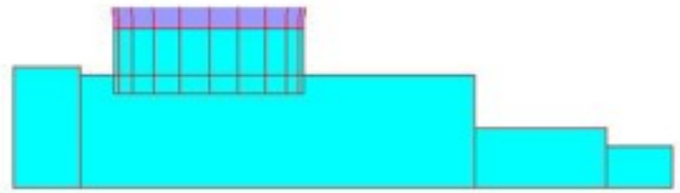
Distance entre :	Valeur en mm
l'arrière du pied et la cheville suivant i	72
les deux hanches suivant k	190
les deux épaules suivant k	251
le centre de l'épaule et la limite haute du torse suivant j	$82,4$
l'orteil et la cheville suivant i	135

Distances entre les centres de liaisons

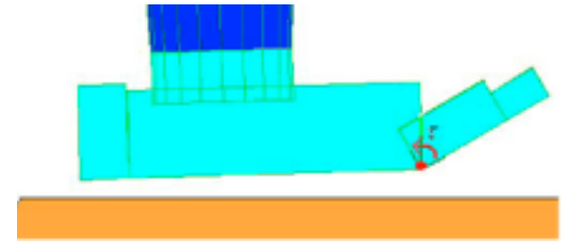
Structure Cinématique

Type du pied?

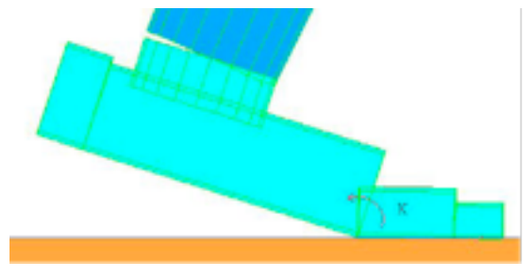
- Consommation énergétique
- Choc pied/sol



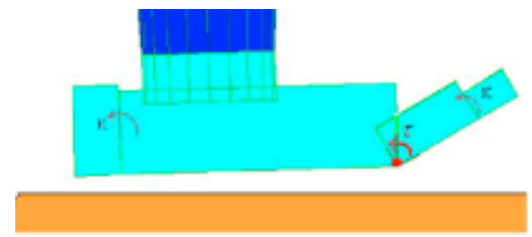
Pied plat



Pied actif

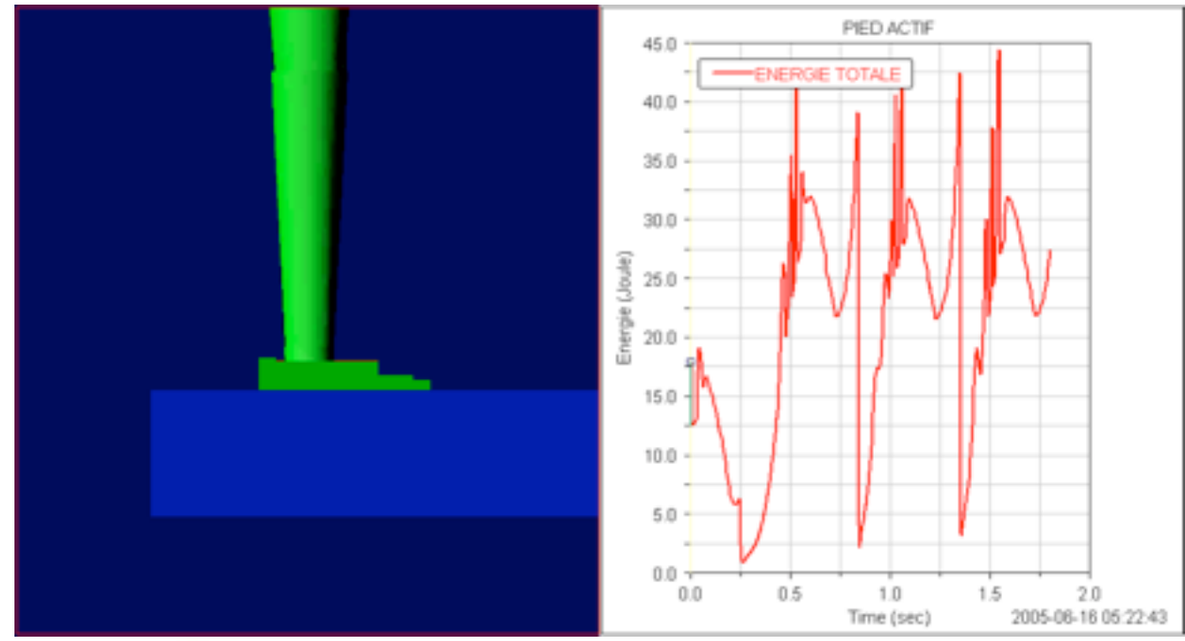


Pied flexible



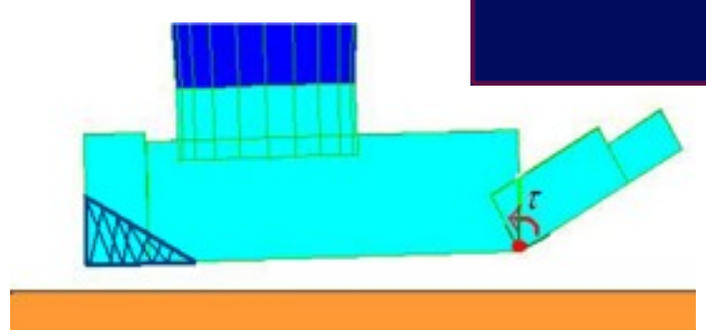
Pied flexible actif

Pied	Économie énergétique	Choc Pied/sol
Pied plat	0%	--
Pied flexible	10%	+
Pied actif	22%	-
Pied actif flexible	25%	++



Choix:

- Pied à 1ddl actif orteil
- Matériau non métallique



Structure Cinématique

Caractéristiques des mouvements ?

Marche Humaine

1,2 m/s

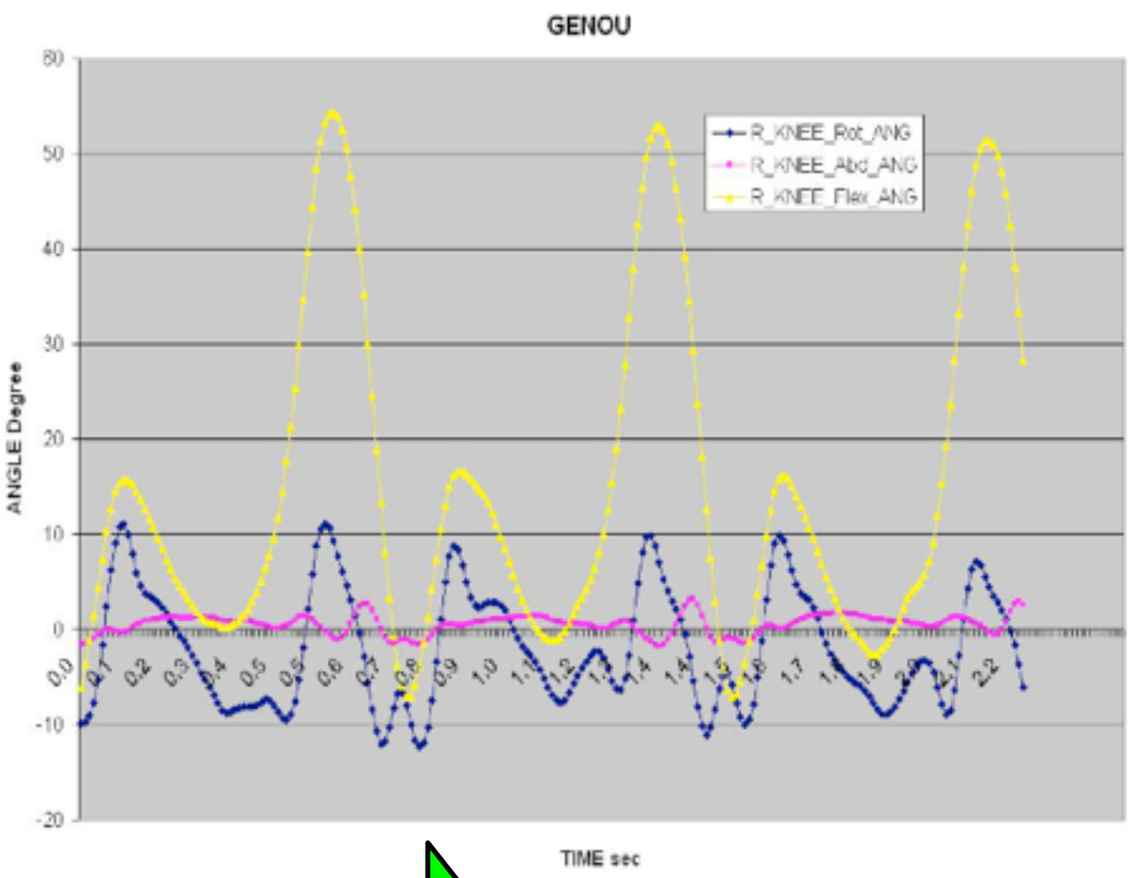
Capture

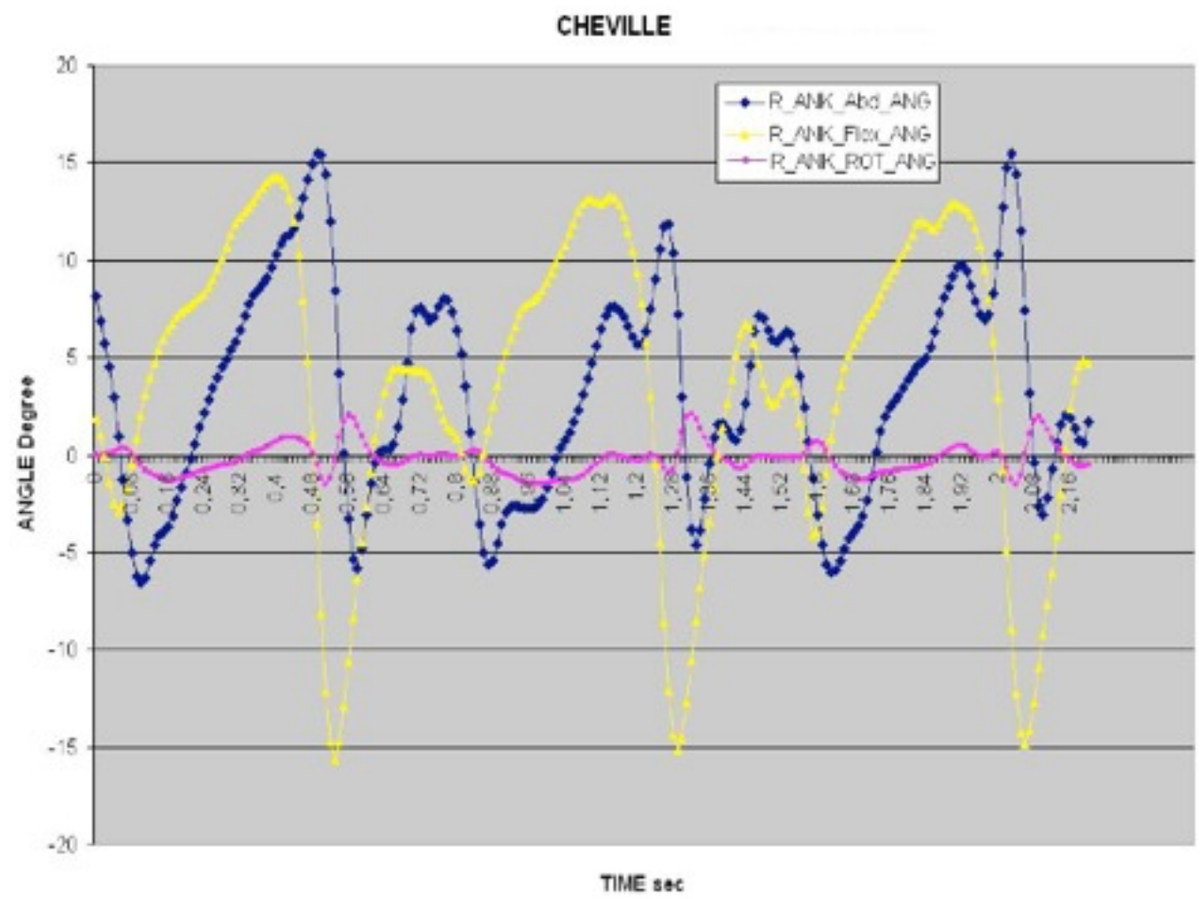
Mouvement

Chaque liaison = 3 ddl

Évolution temporelle

- Angles
- Couples
- Force pied/sol





Genou 1ddl

Cheville 3ddl

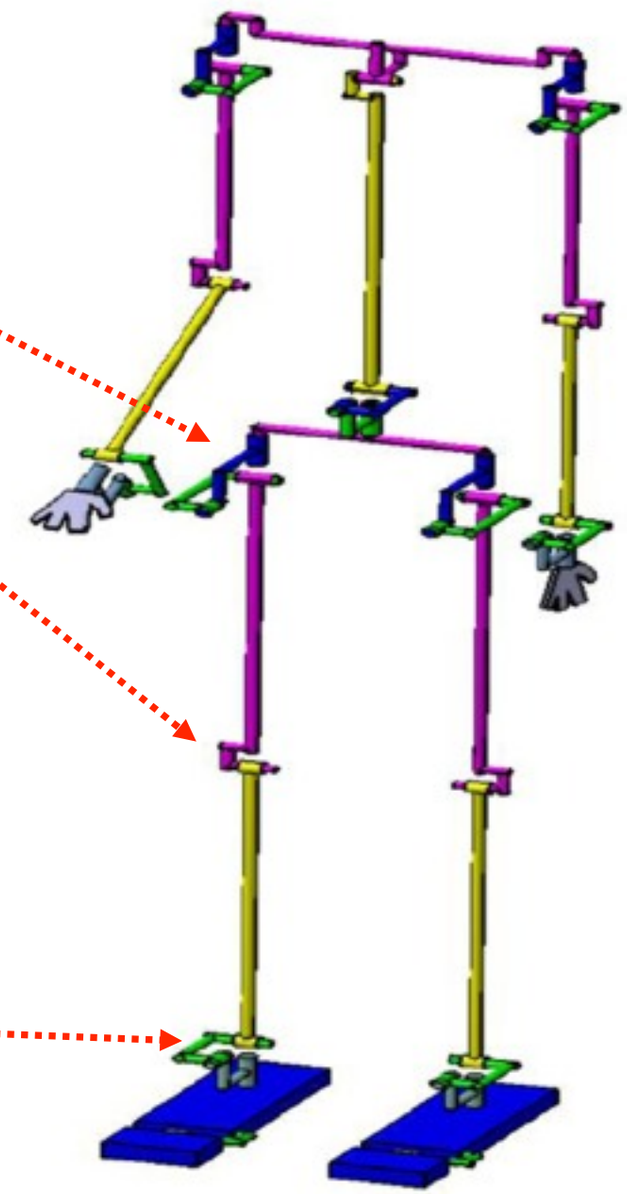
Structure Cinématique

Débattement & Vitesse

Liaison	Débattement	Vitesse
Hanche sagittale	$\pm 90°$	$150°/sec$
Hanche frontale	$\pm 12°$	$130°/sec$
Hanche verticale	$\pm 10°$	$120°/sec$
Genou sagittal	$-5°, +90°$	$400°/sec$
Cheville sagittale	$-15°, +30°$	$250°/sec$
Cheville frontale	$-15°, +15°$	$240°/sec$
Cheville verticale	$-45°, +45°$	$200°/sec$
Bassin haut sagittal	$-15°, +15°$	$45°/sec$
Bassin haut frontal	$-20°, +20°$	$70°/sec$
Bassin haut vertical	$-10°, +10°$	$90°/sec$

Couples nominaux

Liaison	Couple en N.m
Hanche sagittale	50
Hanche frontale	35
Hanche verticale	35
Genou sagittal	35
Cheville sagittale	85
Cheville frontale	20
Cheville verticale	40
Bassin haut sagittal	40
Bassin haut frontal	25
Bassin haut vertical	40



Structure Cinématique

Analyse de la structure

Liaisons à 1ddl rot : genou, coude, pied, torse

Mécanismes simples

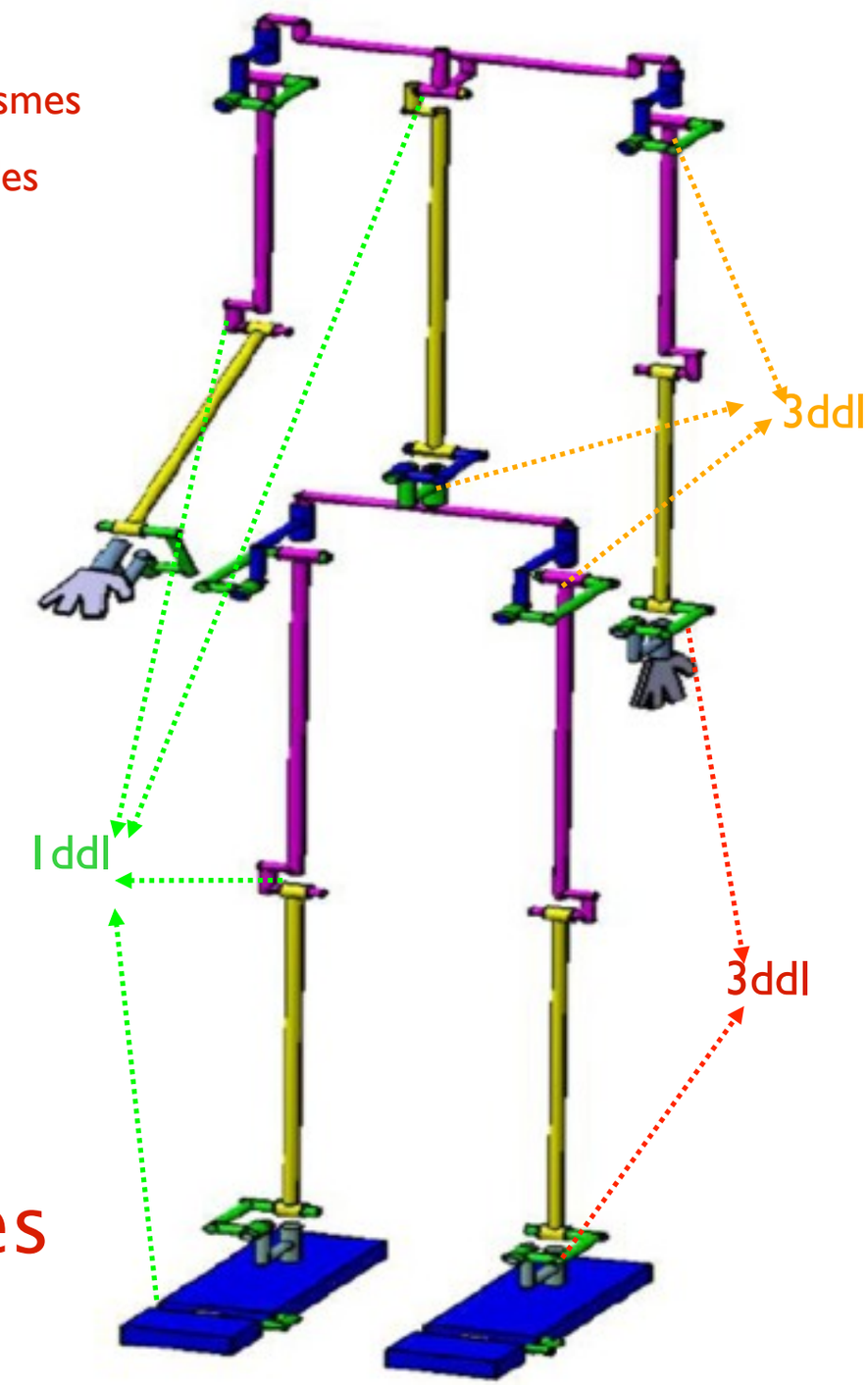
Liaisons sphériques:

Cheville, Poignet, Cou

- Débattements articulaires homogènes
- Espace disponible très réduit
- Loin du CDG

Hanche, Epaule, Bassin haut

- Débattements articulaires non homogènes
- Espace disponible relativement grand
- Proche de CDG



Cinématique du robot HYDROïD

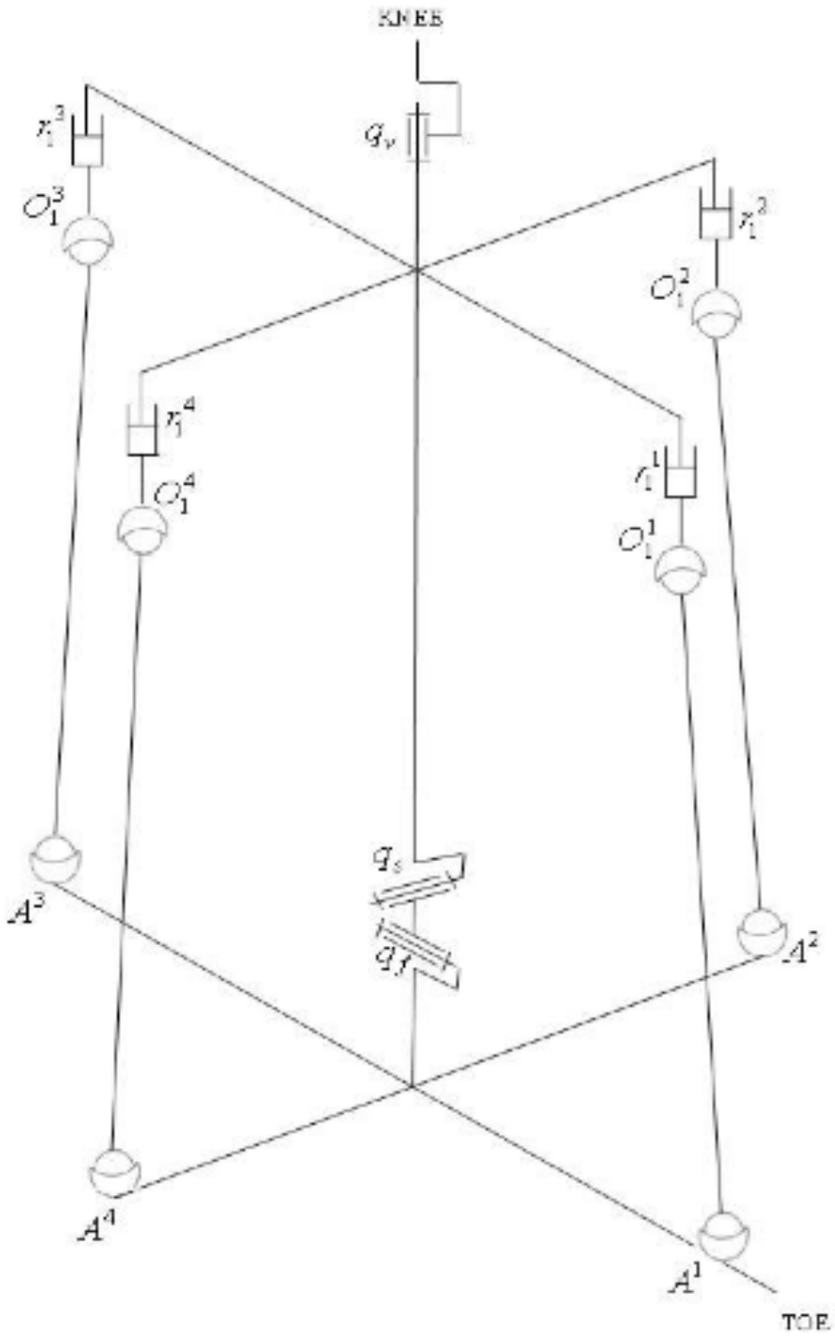
Deux classes de mécanismes sphériques HYBRIDES

Cheville de HYDROïD (brevet)

Entrée: $\mathbf{r_a} = (r_1^1, r_1^2, r_1^3, r_1^4, q_v)^t$

Sortie (//) : $\mathbf{q_a} = (q_s, q_f)^t$

Sortie: $\mathbf{X_a} = (\theta_r, \theta_y, \theta_p)^t$



Débattements proches

Contraintes d'encombrement fortes

CdG proche du genou

Réduire le nombre de pièces

Motorisation

- Hydraulique
- Electrique

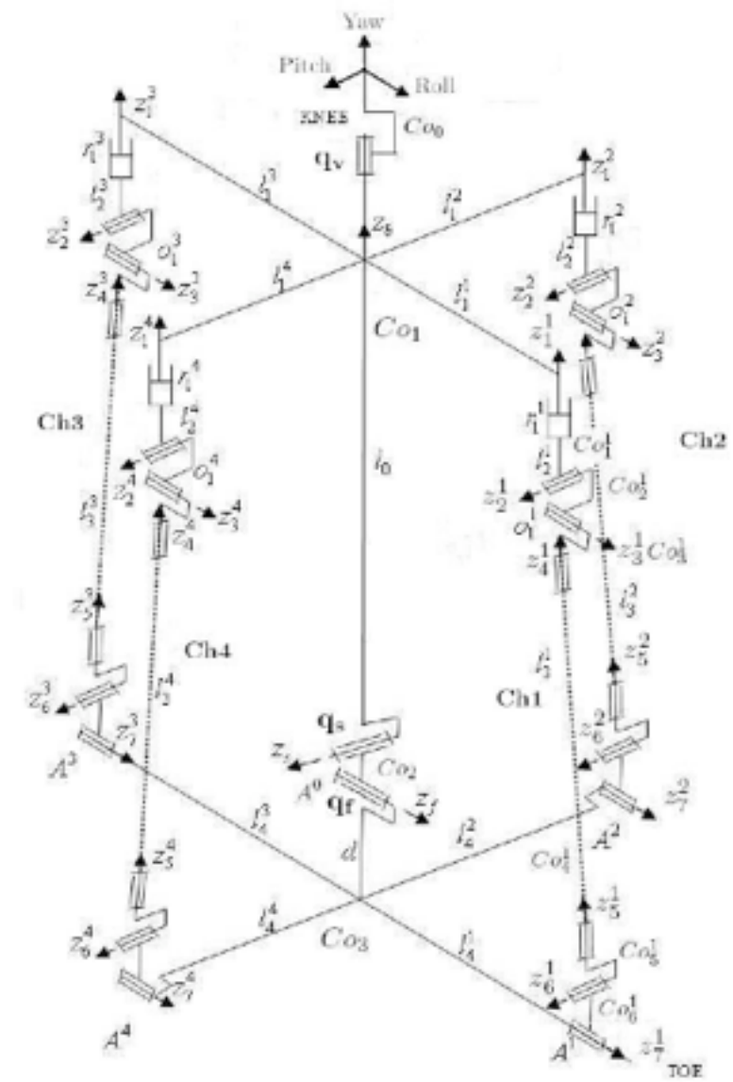
Modèles de la Cheville

MGI:

- Câble modélisé par un corps rigide et 2 rotules
- Mécanisme Equivalent (chaîne ouverte)

$$r_1^j = -l_4^j S_{q_s} + dC_{q_s}C_{q_f} - l_0 l_3^j C_2^j C_3^j - l_2^j$$ Pour j={1,3}

$$r_1^j = -l_4^j C_{q_s} S_{q_f} + dC_{q_s}C_{q_f} - l_0 l_3^j C_2^j C_3^j - l_2^j$$ Pour j={2,4}



Modèle cinématique :

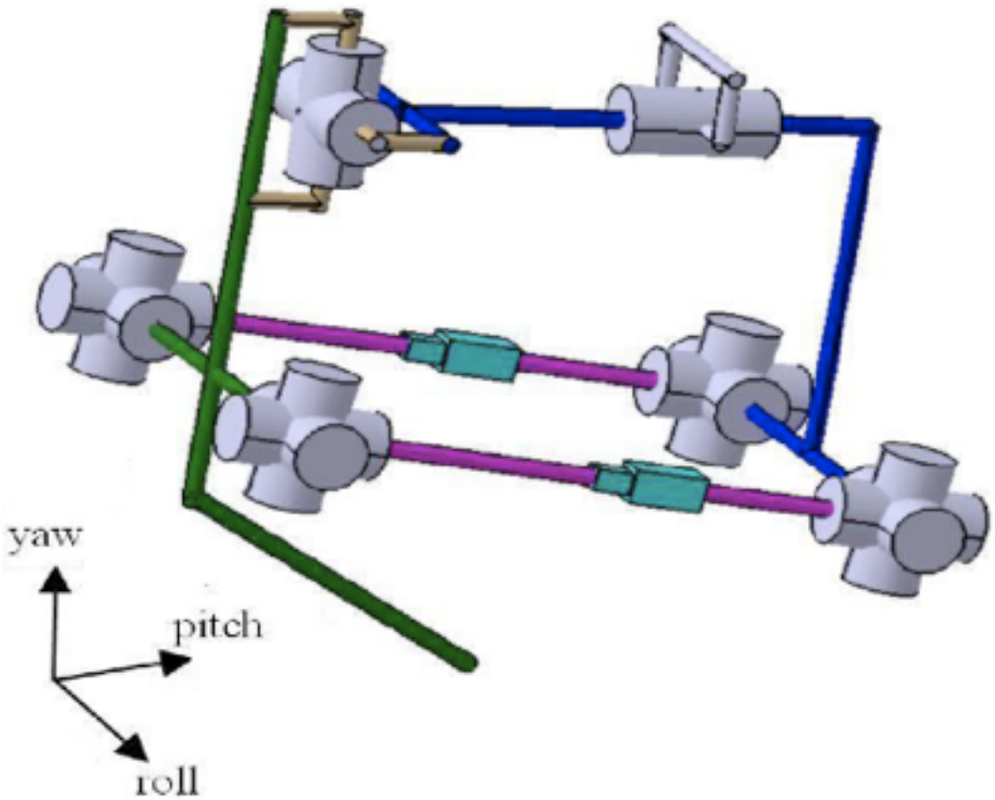
- Théorème vissage réciproque

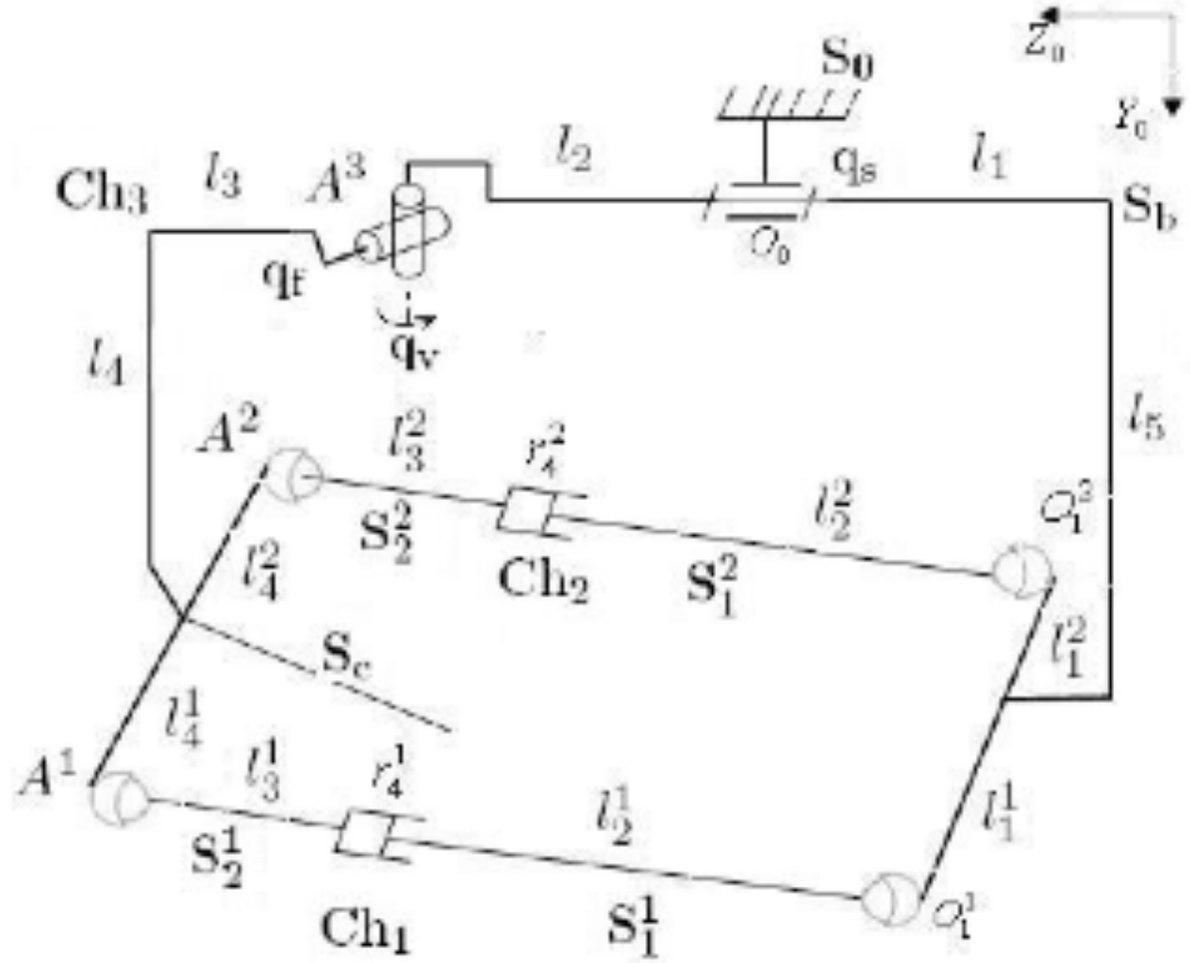
$$\mathbf{A_a D_a^{-1} \dot{X}_a = B_a \dot{r}_a}$$

Analyse de singularité :

$$\left.\begin{array}{l} \det(\mathbf{D_h}) = 0 \\ \det(\mathbf{A_a}[1..2,1..2]) = 0 \\ \det(\mathbf{B_a}[1..2,1..2]) = 0 \end{array}\right\} \longrightarrow \quad q_s = \pm\frac{\pi}{2}, q_f = \pm\frac{\pi}{2}$$

Hanche de HYDROïD (brevet)





Entrée $\mathbf{r_h} = (r_4^1, r_4^2, q_s)^t$

Sortie (//) $\mathbf{q_h} = (q_v, q_f)^t$

Sortie: $\mathbf{X_h^d} = (\theta_r^d, \theta_y^d, \theta_p^d)^t$

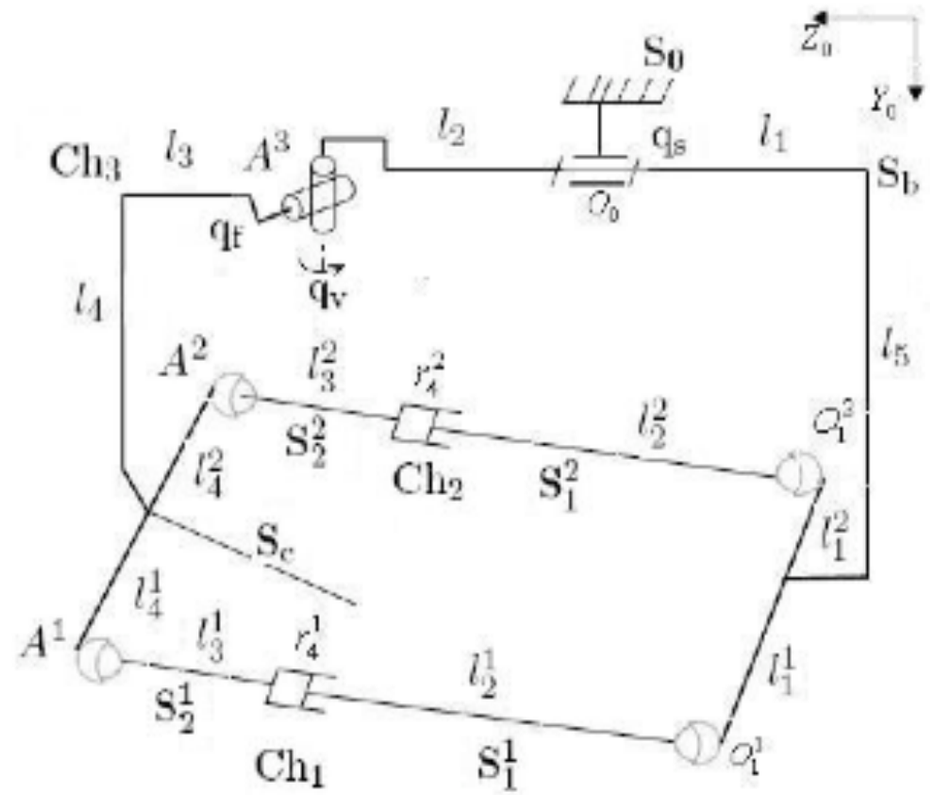
- Débattements très différents
- Optimisation de l'encombrement
- Réduction du nombre de pièces

Modèles de la hanche

MGI:

$$r_4^1 = \frac{L_{14}C_{q_v}S_{\alpha-q_f} - l_4^1 C_{q_v} + l_2 + l_1}{C_2^1 C_3^1} - l_2^1 - l_3^1$$

$$r_4^2 = \frac{L_{14}C_{q_v}S_{\alpha-q_f} + l_4^2 S_{q_v} + l_2 + l_1}{C_2^2 C_3^2} - l_2^2 - l_3^2$$



Modèle cinématique :

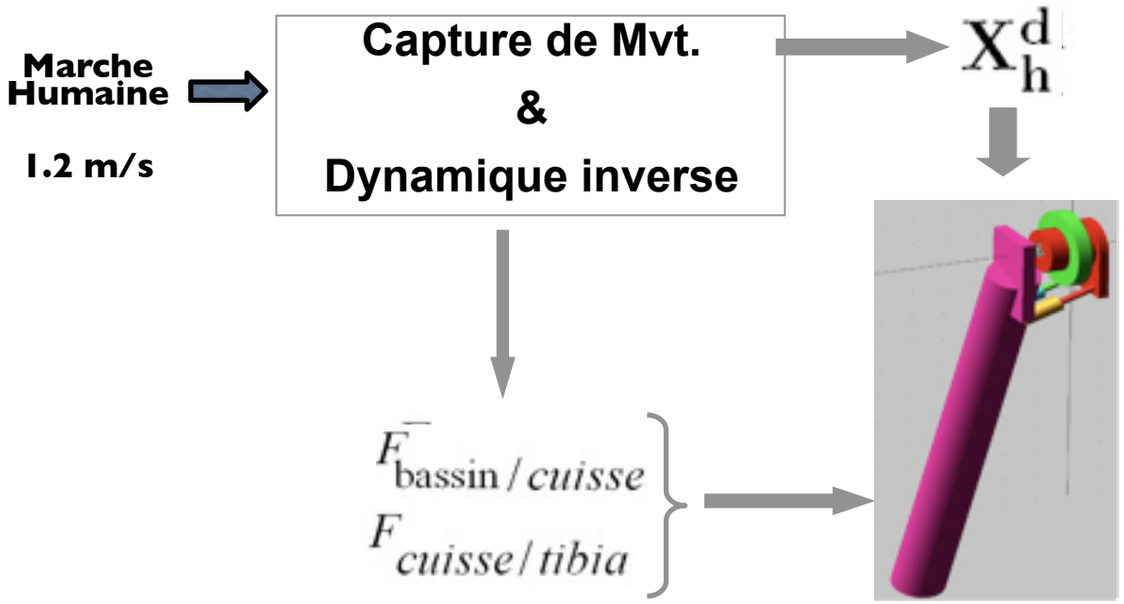
$$\mathbf{A_h}.\mathbf{D_h}^{-1}\dot{\mathbf{X}}_\mathbf{h} = \mathbf{B_h}.\dot{\mathbf{r}}_\mathbf{h}$$

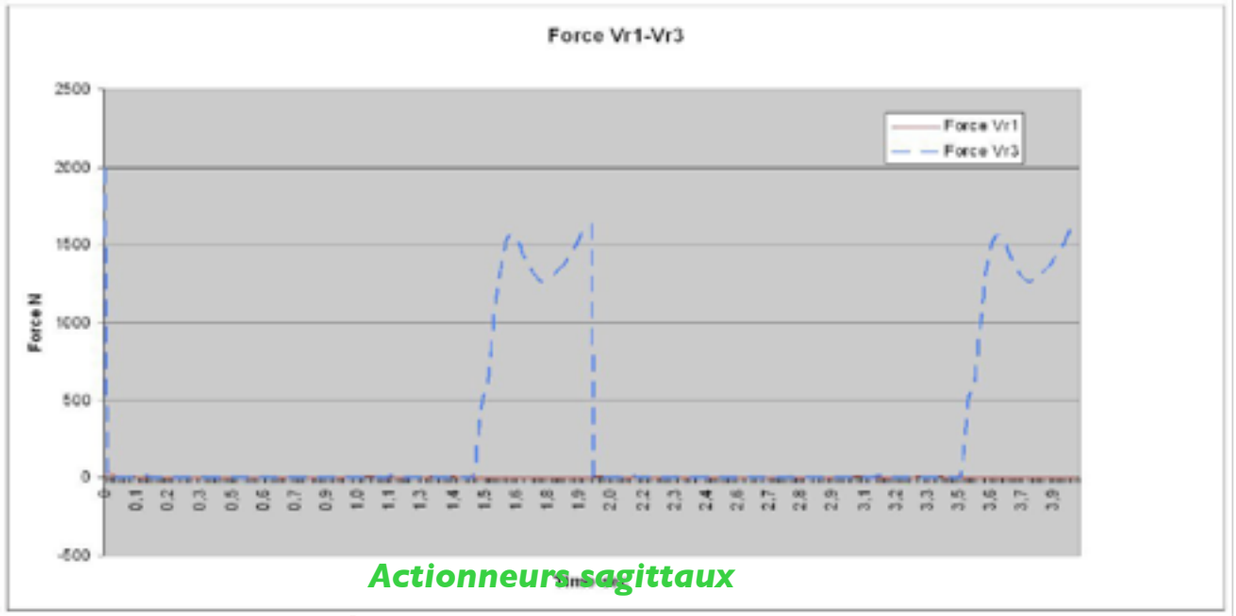
Analyse de singularité :

$$\left.\begin{array}{l} \det(\mathbf{D_h}) = 0 \\ \det(\mathbf{A_h}) = 0 \\ \det(\mathbf{B_h}) = 0 \end{array}\right\} \longrightarrow \quad q_v = \pm\frac{\pi}{2} \;\; ; \;\; q_f = -\frac{\pi}{3} \;\; ; \;\; qf = \frac{2\pi}{3}$$

Outils du Simulation

- Pre-dimensionnement durant la phase de conception

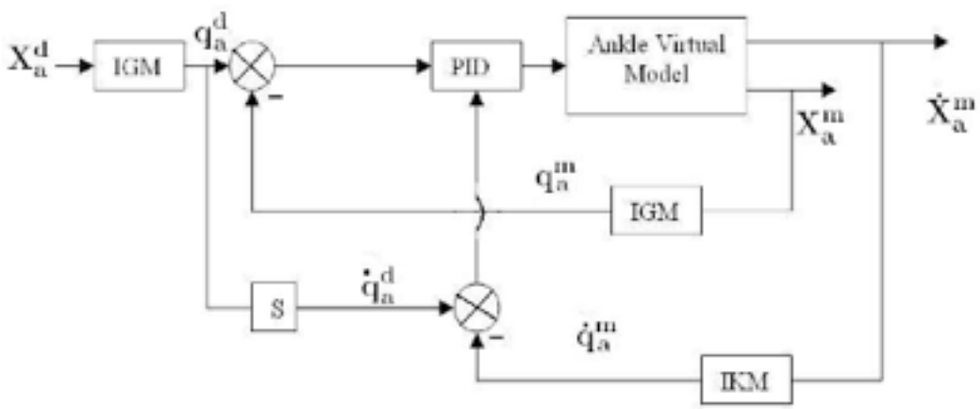


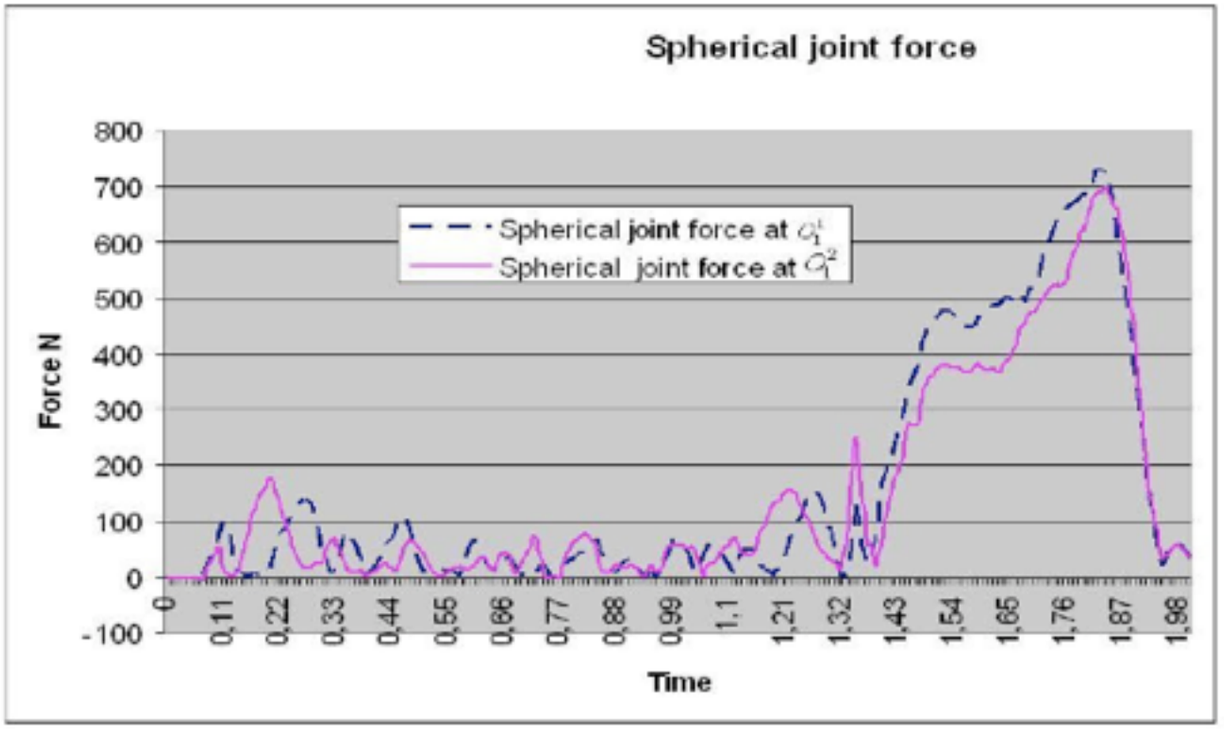


Actionneurs sagittaux

À rendre Non symétrique

Boucle de commande bas niveau :

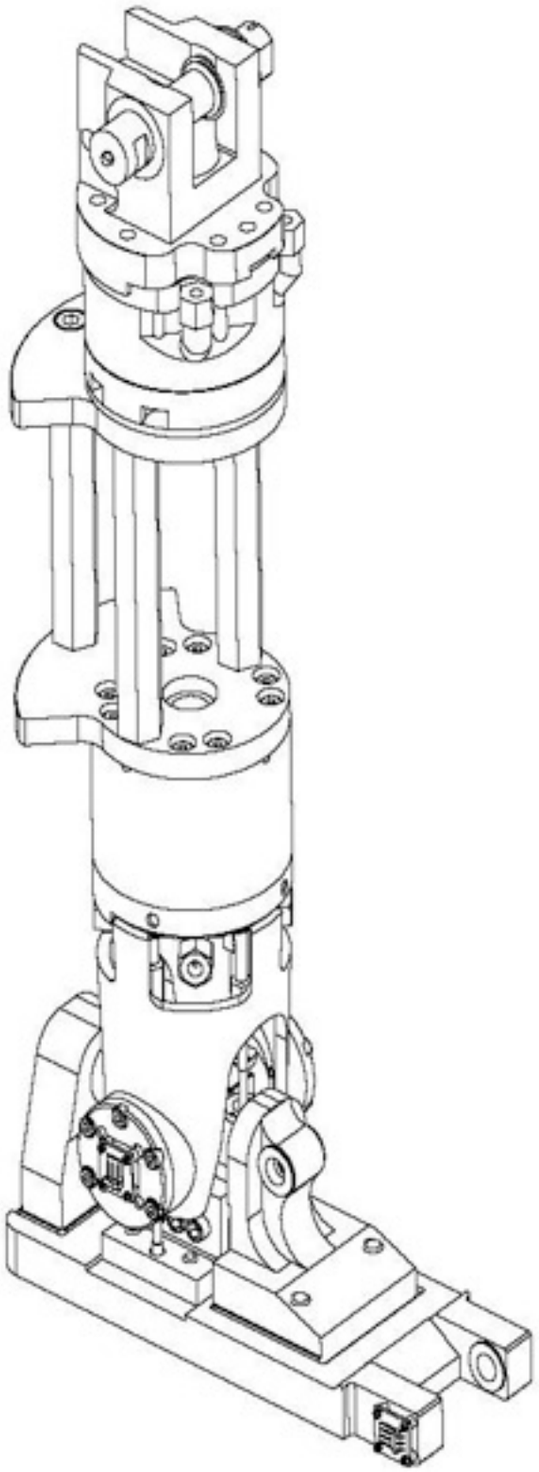




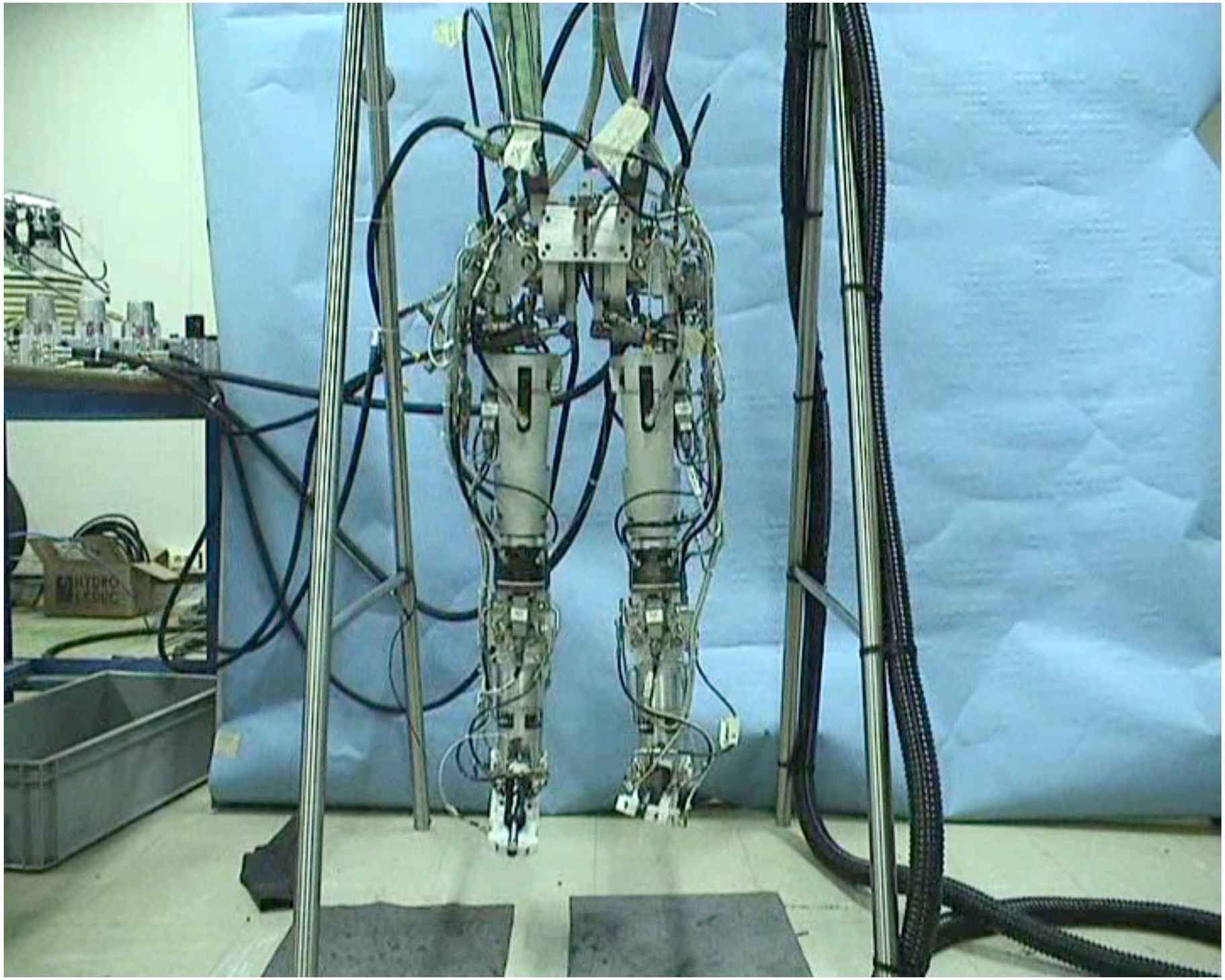
Composants du commerce

Conception & Réalisation
Tests préliminaires

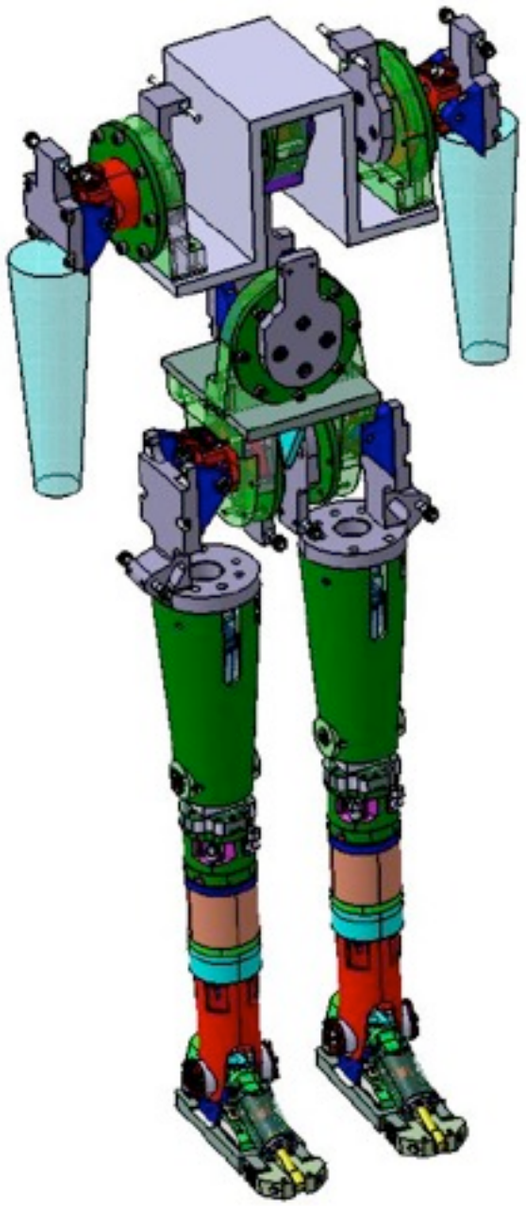
Conception & Réalisation
Tests préliminaires

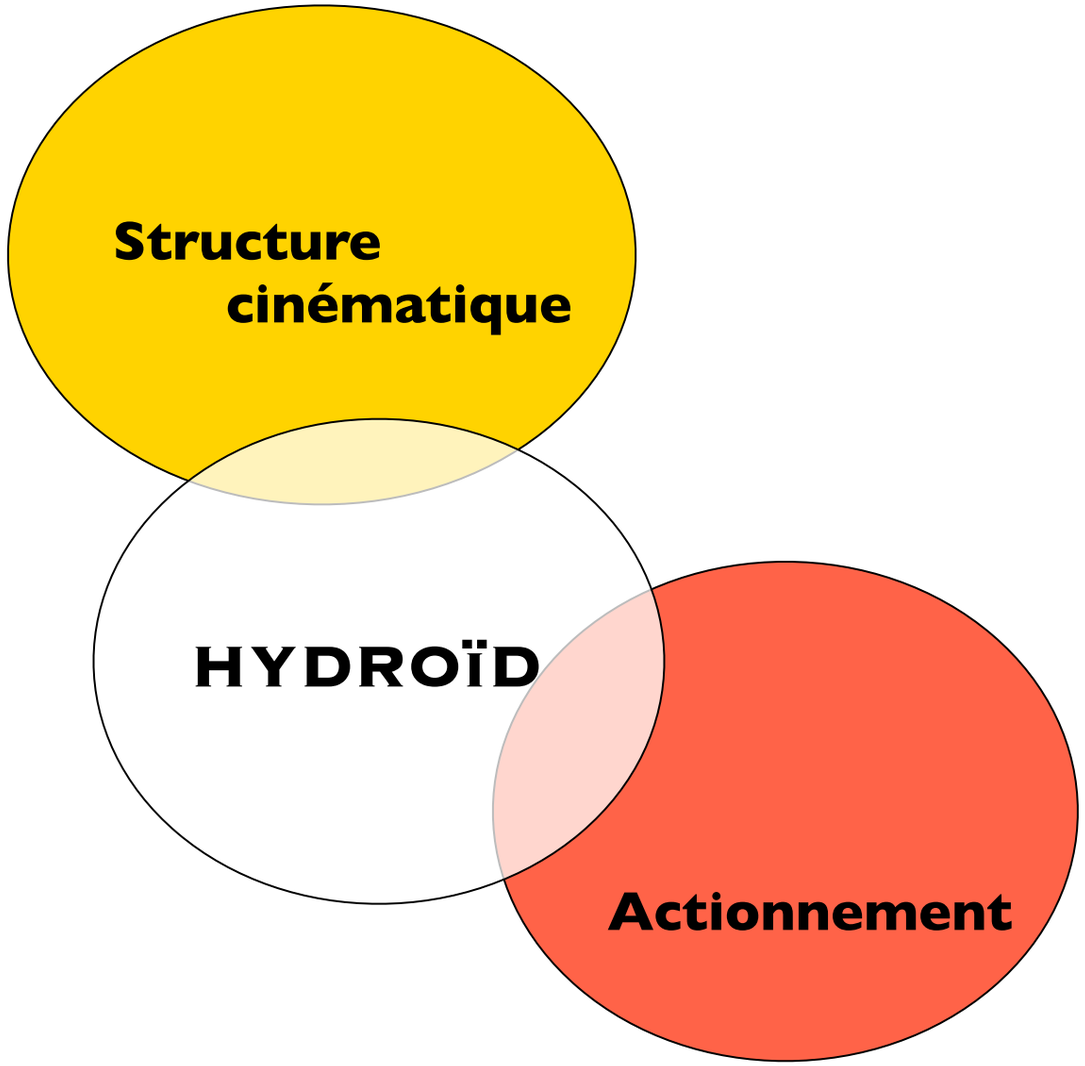


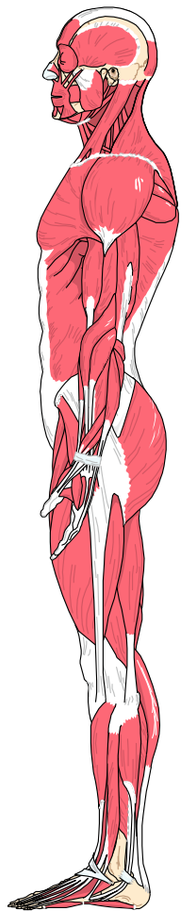
Conception & Réalisation
Tests préliminaires



HYDROïD - Actionnement







Objectif:

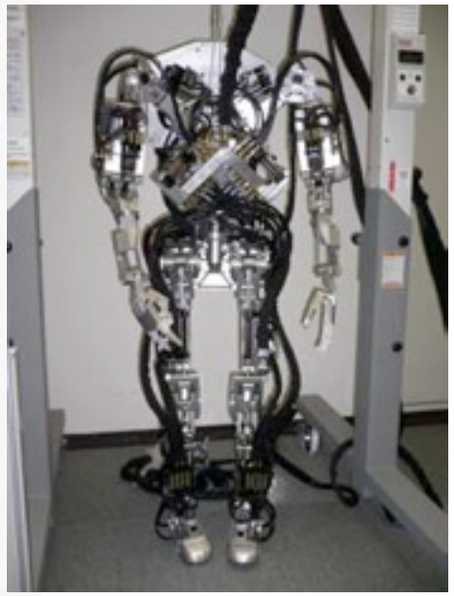
Amélioration de la puissance massique

Solutions existantes

- **Moteur électrique & Réducteur**
- Faible coût & Facilité de contrôle local (+)
- Connexions rigide (moteur & charge) (-)
- Rapport de réduction fixe & limité (-)
- Sur-dimensionnement des moteurs (-)

- **Groupe hydraulique central**
- Couple élevé (+)
- Mouvement fluide (+)
- Connexions et fuites (-)
- Groupe central
    - poids (-)
    - sur-dimensionnement (-)

HRP2

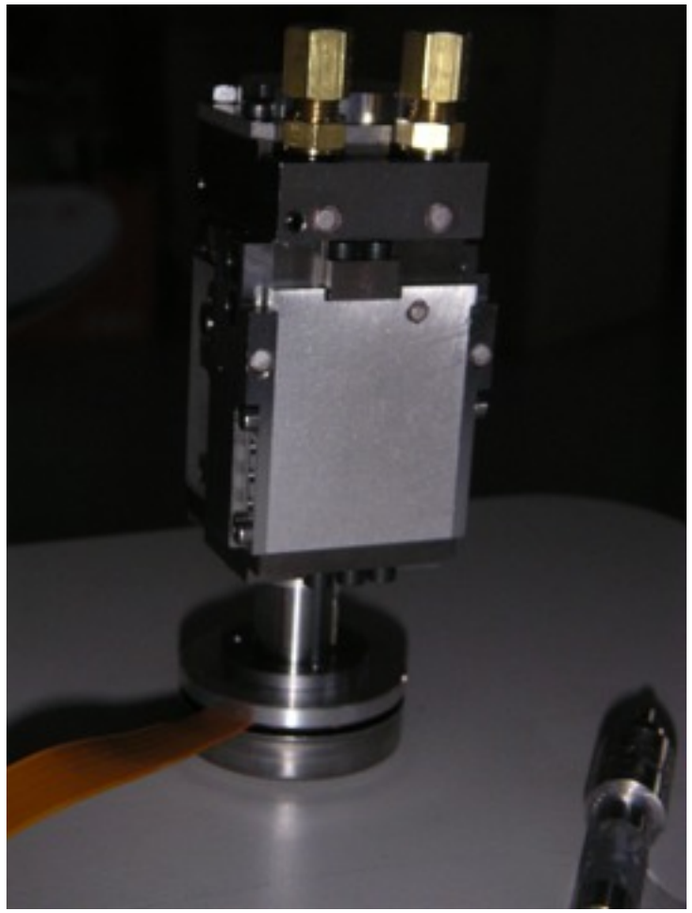


ATR- SARCOS

Nouvelle Solution (brevet)

- Fusionner les avantages des solutions existantes
- Actionneur Hydraulique Intégré par liaison

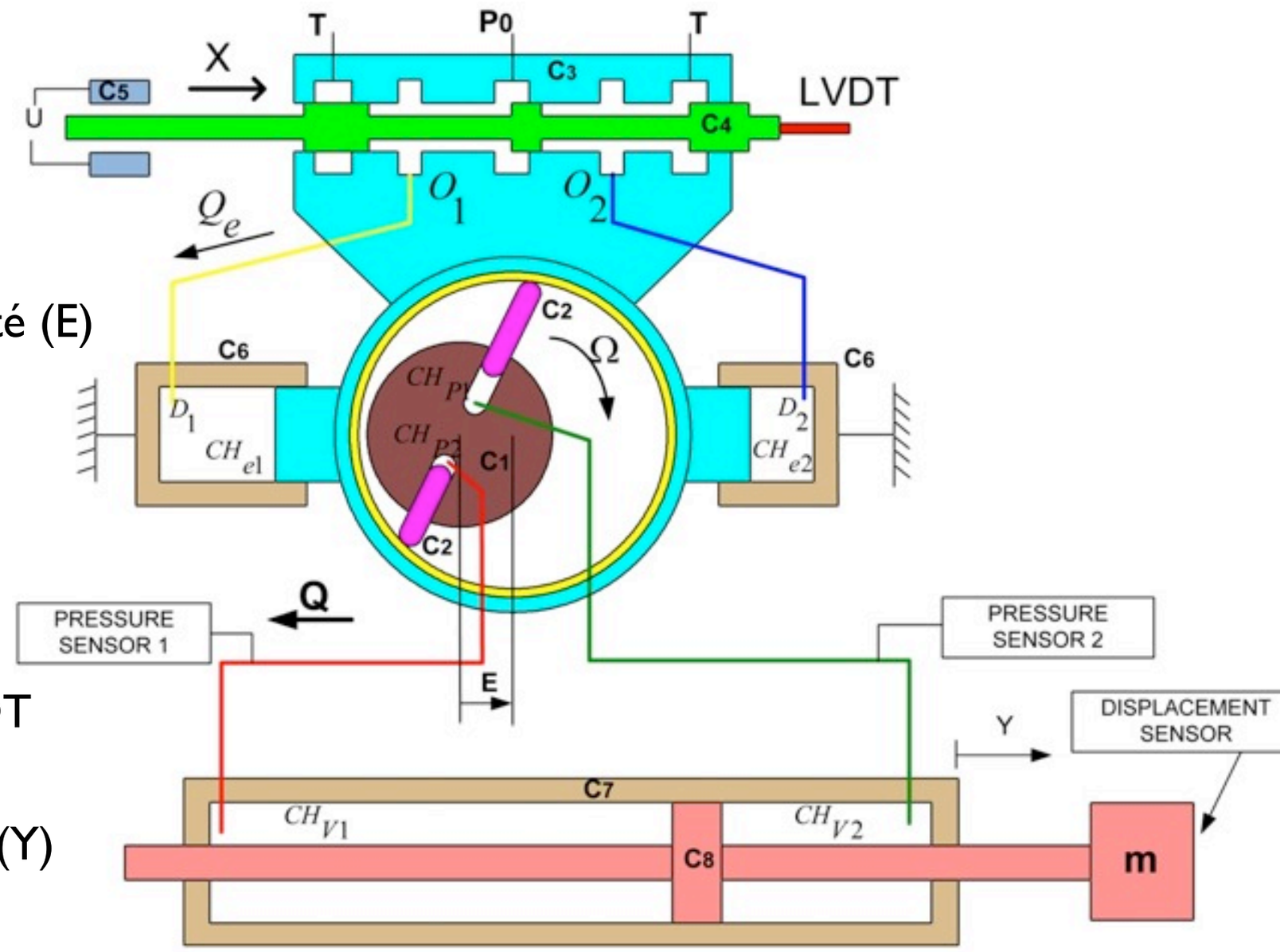
  - Couple élevé à la sortie
  - Optimisation du volume disponible
  - Optimisation de la pression au besoin de la liaison
  - Réduction des tuyaux de connections
  - Echange de puissance entre liaisons voisines



Actionneur Hydraulique Intégré

Principe de Fonctionnement

- Moteur Electrique
- Micro-pompe Volumétrique
- Débit variable (Q) # Excentricité (E)
- Chariot de la micro-pompe
- Micro-valve intégrée
- Electo-aimant (X), Capteur LVDT
- Capteurs de pression # Charge (Y)
- Sens de rotation du moteur unique !
- E petit, Q(--), P (++) ; E grand Q(++), P(--)

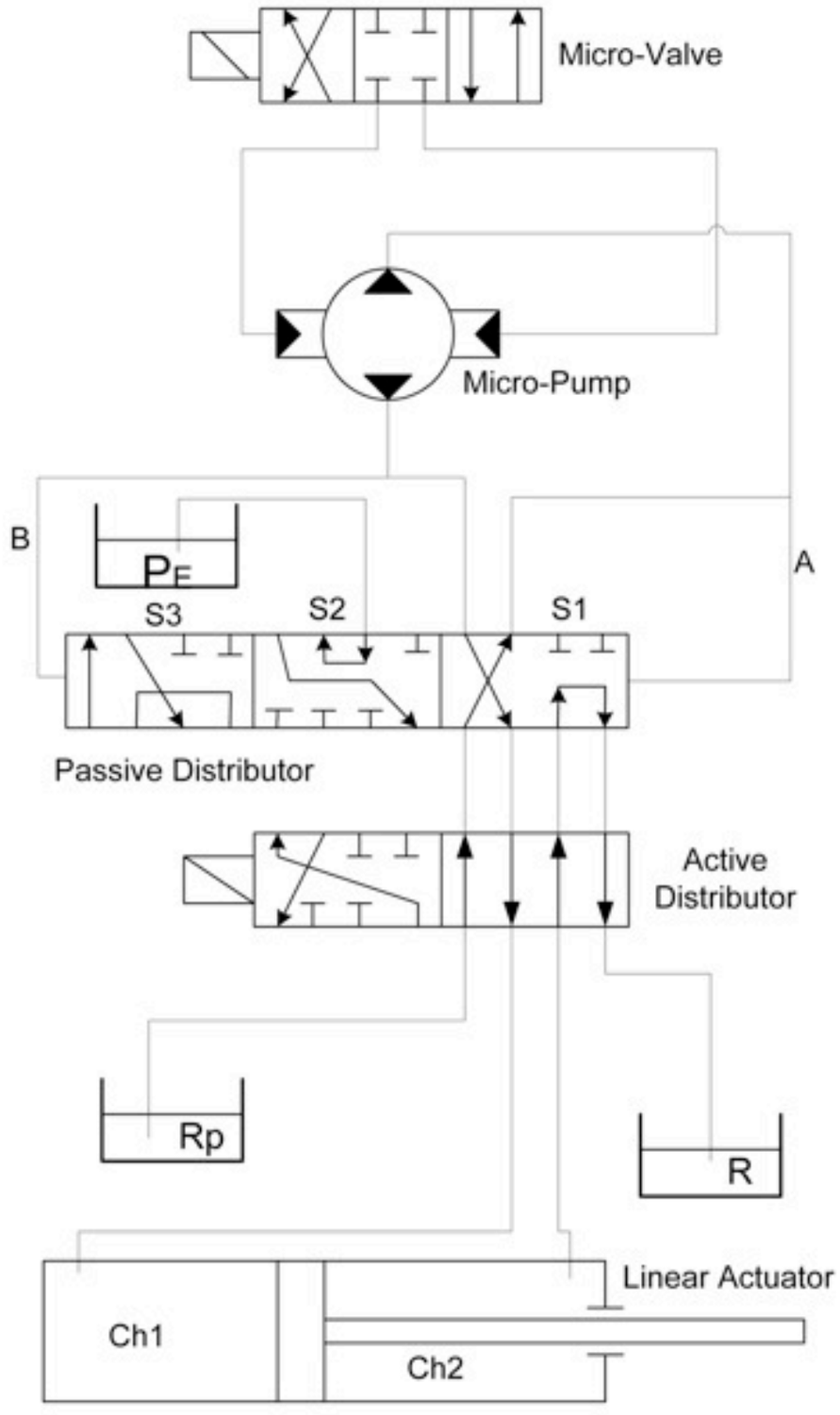


Rapport de réduction
continûment variable !!!

Actionneur Hydraulique Intégré

Schéma Hydraulique

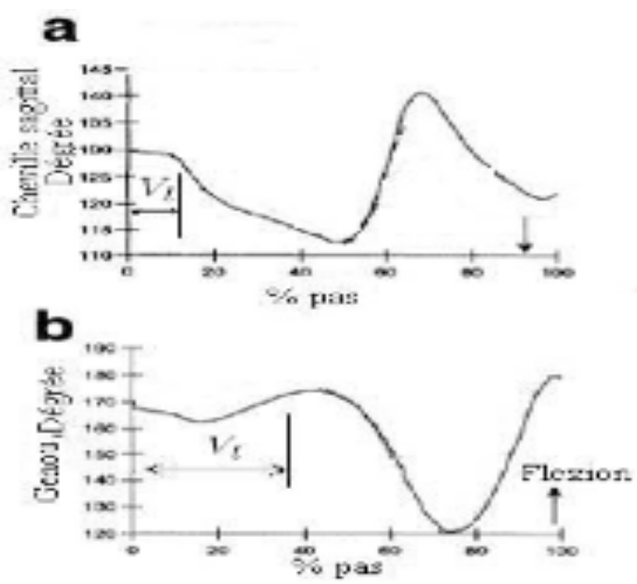
- Lignes de la micropompe A & B
- Distributeur rotatif passif
- Réservoirs intégrés
  - Atmosphérique (R)
  - Fuites (PE)
  - Préchargé (Rp)
- 3 positions (S1, S2, S3)
  - S1 : PA < PB, S2 : PA = PB, S3 : PA > PB

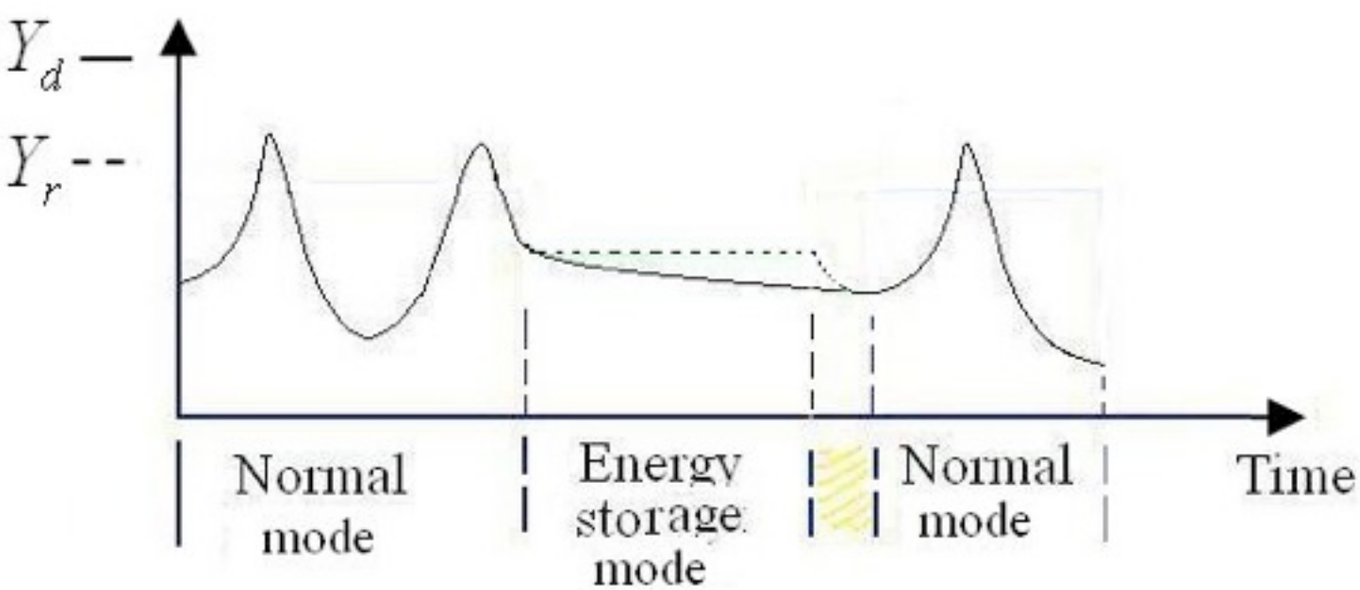


Fonctionnement normal

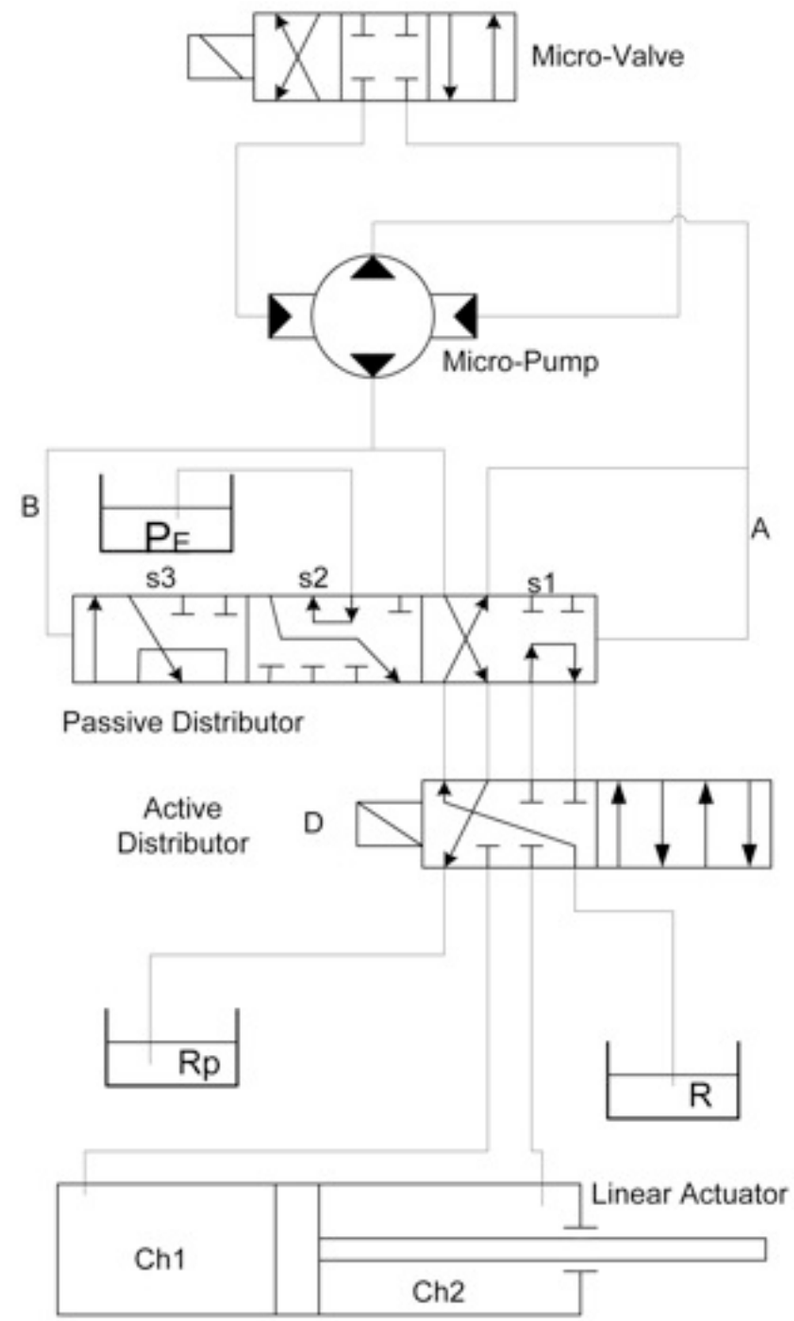
Stockage d'énergie

Cycle de charge # 2 modes





- Distributeur linéaire actif (D)



Loi entrée/sortie

- Eq. Newton pour la charge M :

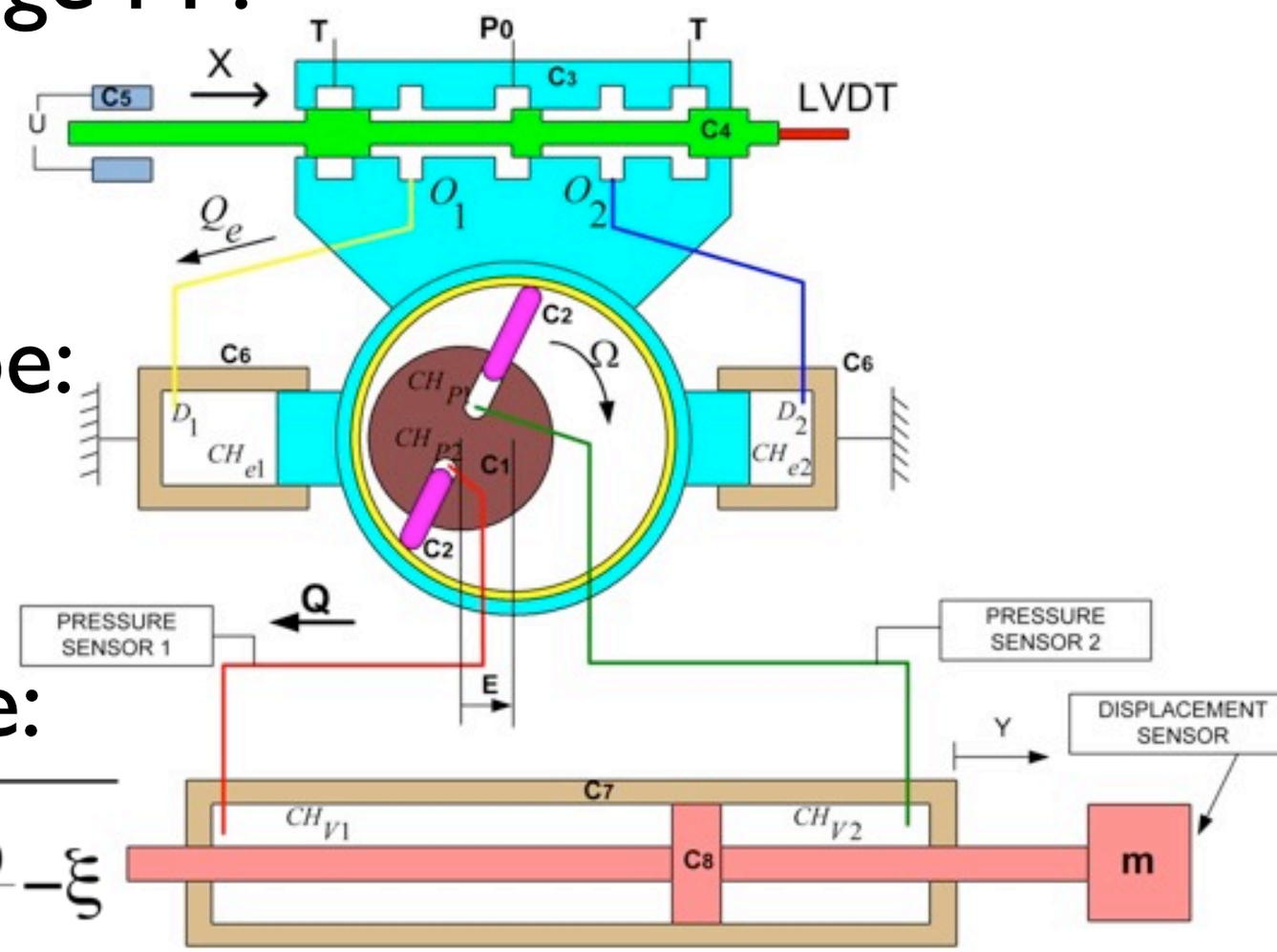
$$m * \ddot{Y} = S_c * \Delta P$$

- Débit de la micro-pompe:

$$Q = 2 * N * S_p * E * \omega$$

- Débit de la micro-valve:

$$Q_e = C * 2\pi r * \sqrt{\frac{2}{\rho}} * (X - E) * \sqrt{\frac{P_0}{2} - \xi}$$



- Eq. Newton pour le chariot:

$$m_e * \ddot{E} = P * S_p * \cos(\omega t) + 2\zeta * S_e$$

Loi entrée/sortie

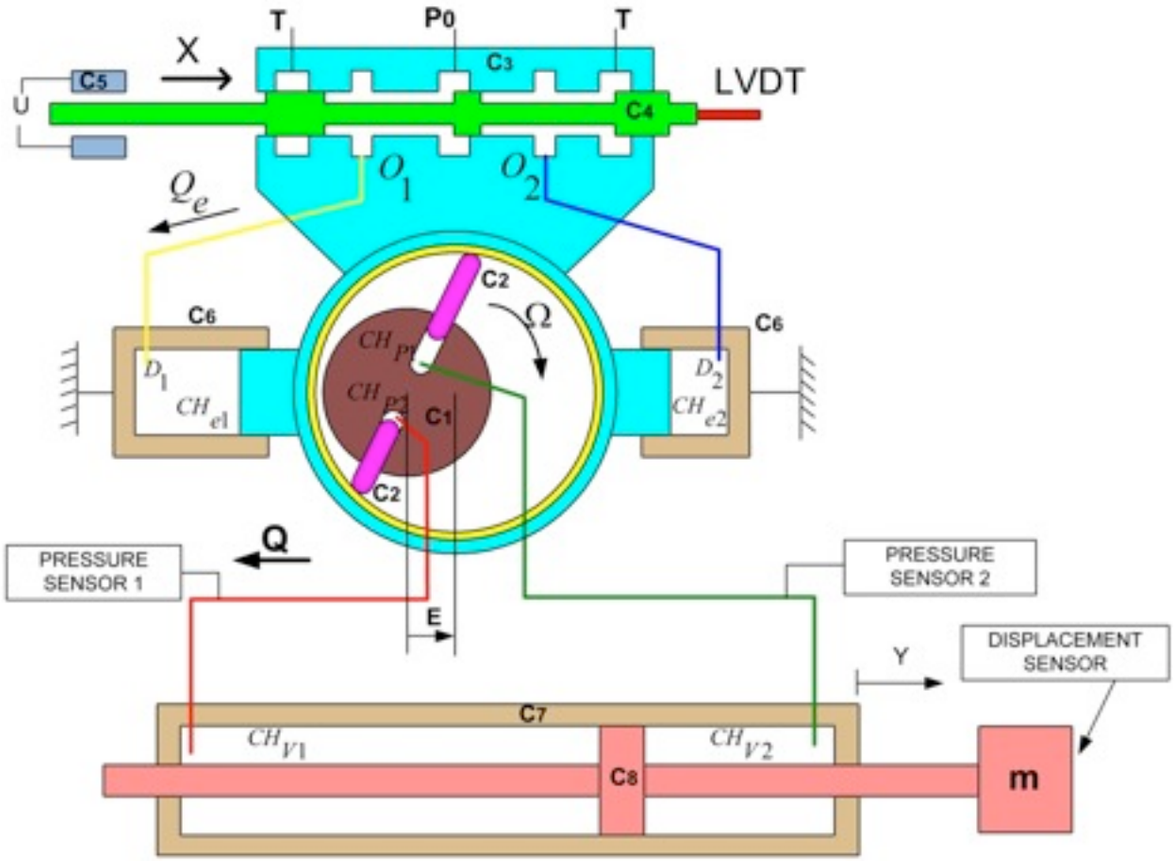
- Débit de la micro-pompe :

$$Q = S_c * \dot{Y}$$

- Débit de la micro-valve:

$$Q_e = S_e * \dot{E}$$

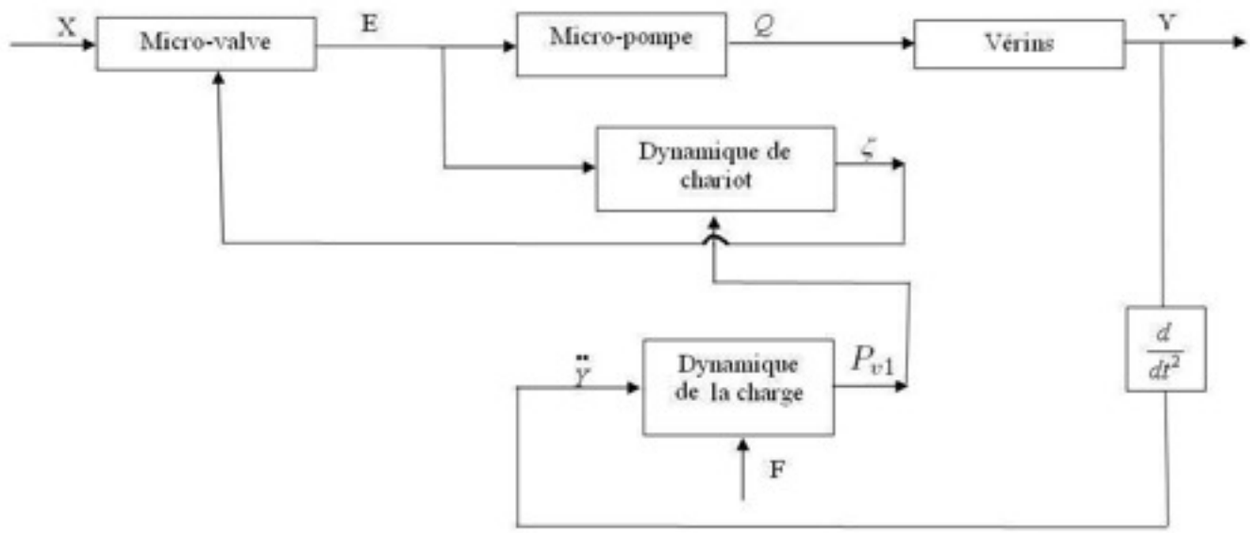
- Pour $\omega = cte$



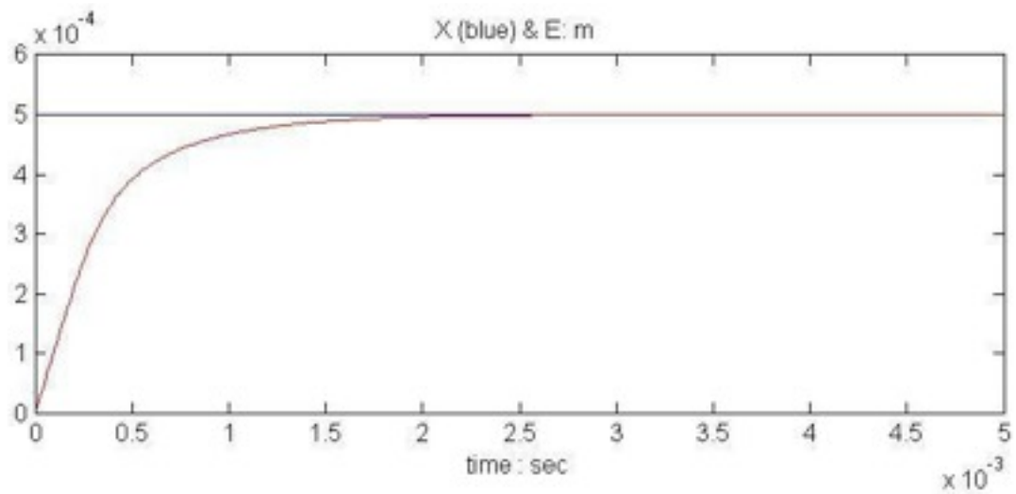
$$X = \frac{C_4}{C_1 * \omega} * \frac{\ddot{Y}}{\sqrt{\frac{P_0}{2} + \frac{C_3 m \ddot{Y}}{S_c}\cos(\omega t) - C_2 C_4 \frac{\dddot{Y}}{\omega}}} + \frac{C_4}{\omega}\dot{Y}$$

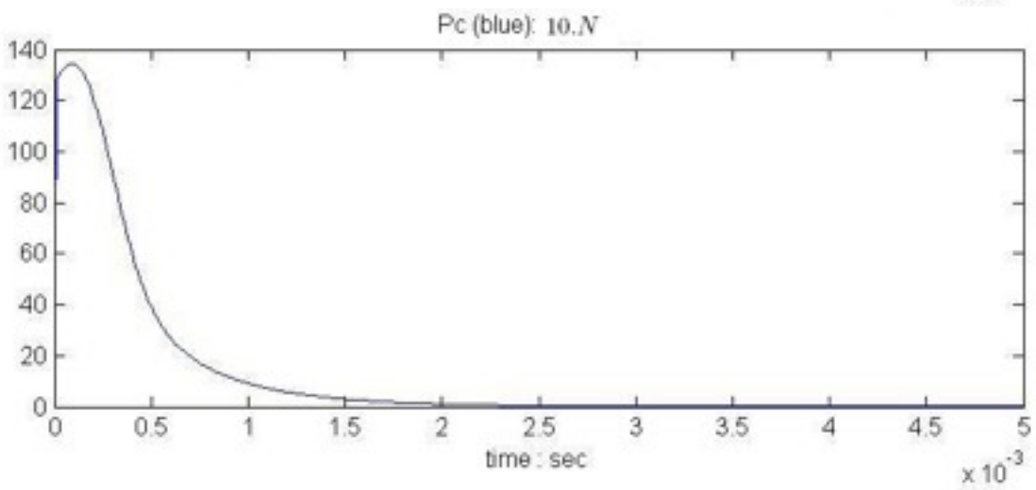
- **Equation non-linéaire**
- **Jerk**

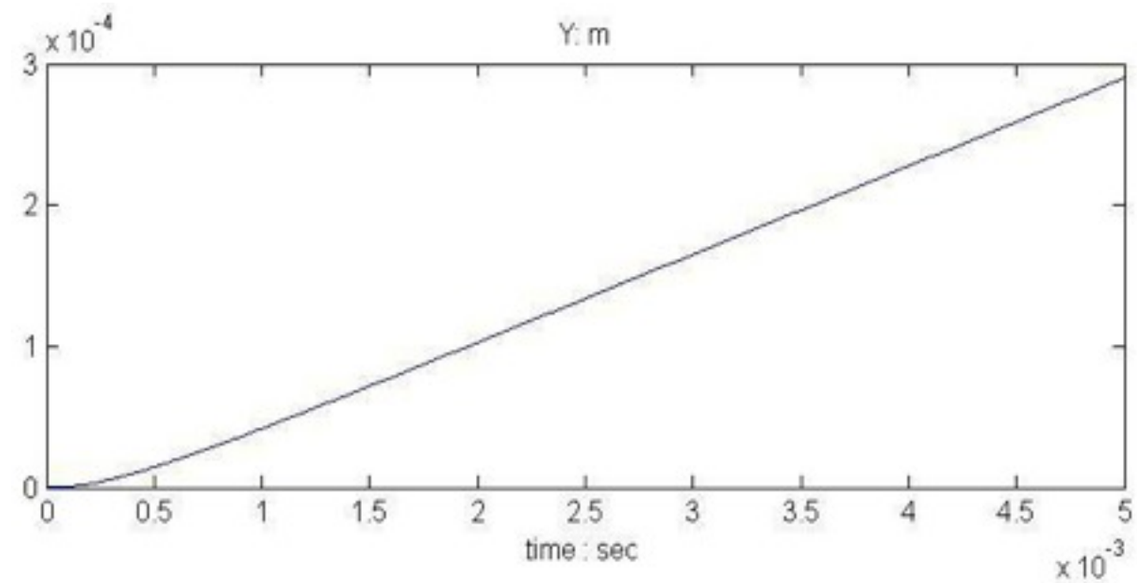
Simulation



Variable	Signification physique	Valeur
m	Masse de la charge	10 Kg
m_e	Masse du chariot	0,09 Kg
n_p	Nombre de pistons	15
S_v	Surface du vérin	2,35 cm^2
S_p	Surface du piston	0,19 cm^2
S_e	Surface active du chariot	1,64 cm^2
E_{max}	Excentricité maximale	0,05 cm
r_{tig}	Rayon de la micro-valve	0,25 cm

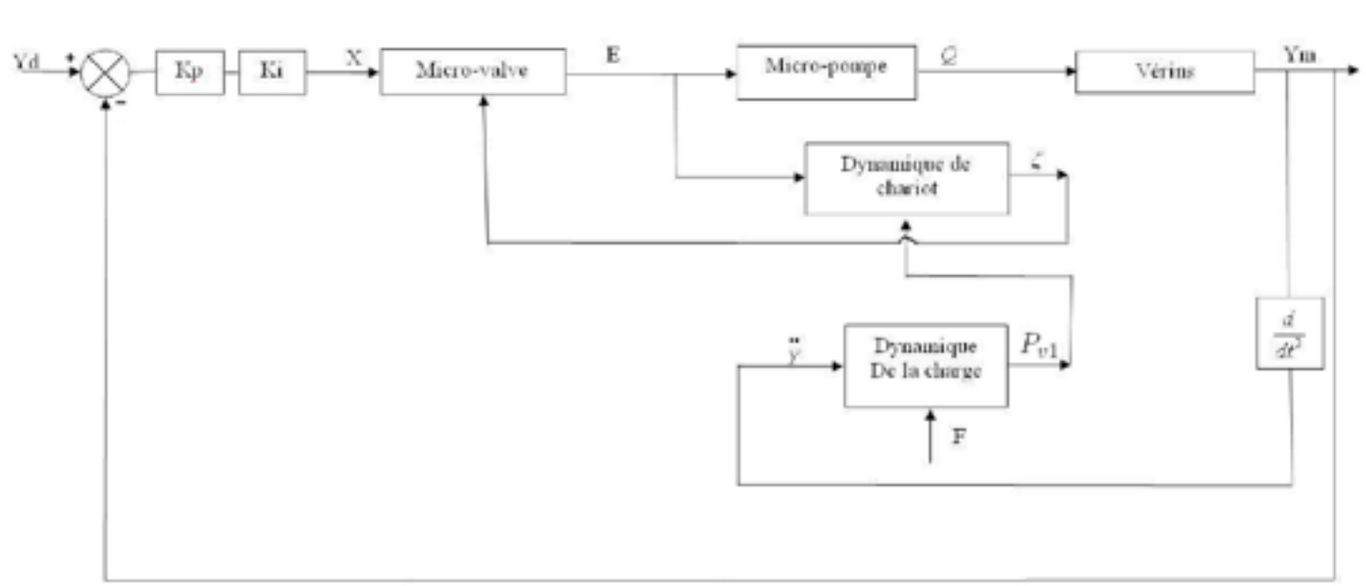






- Temps de réponse de E=1.5 ms
- Y augmentation à vitesse constante

Simulation



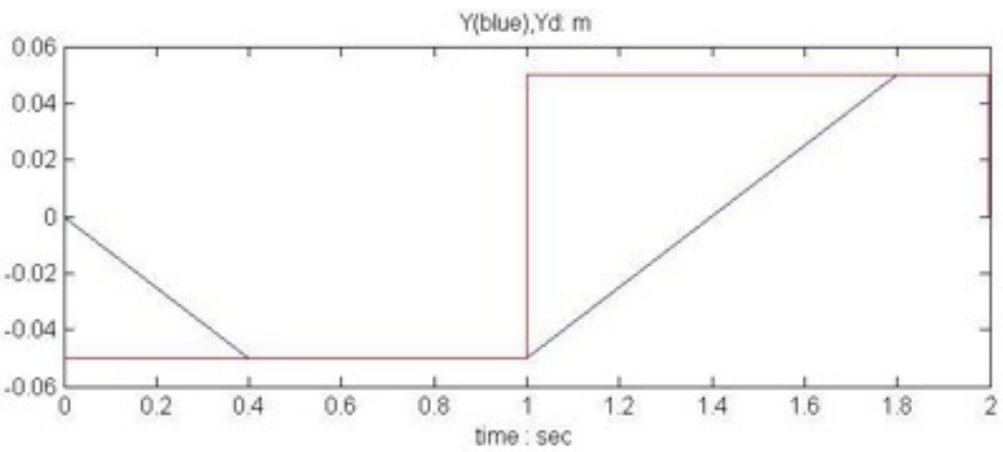
M=10kg

Xmax=1 mm

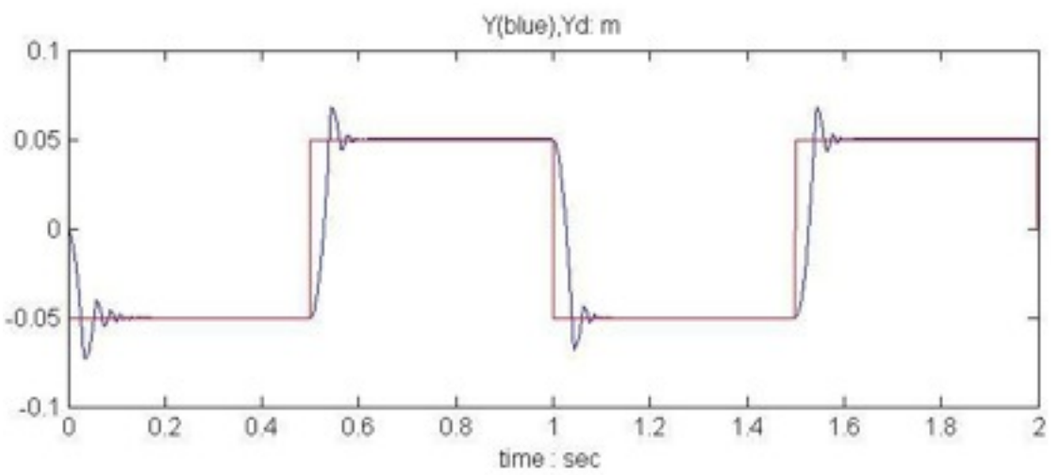
Emax=0.5 mm

Kp=0.01

Ki=0.3



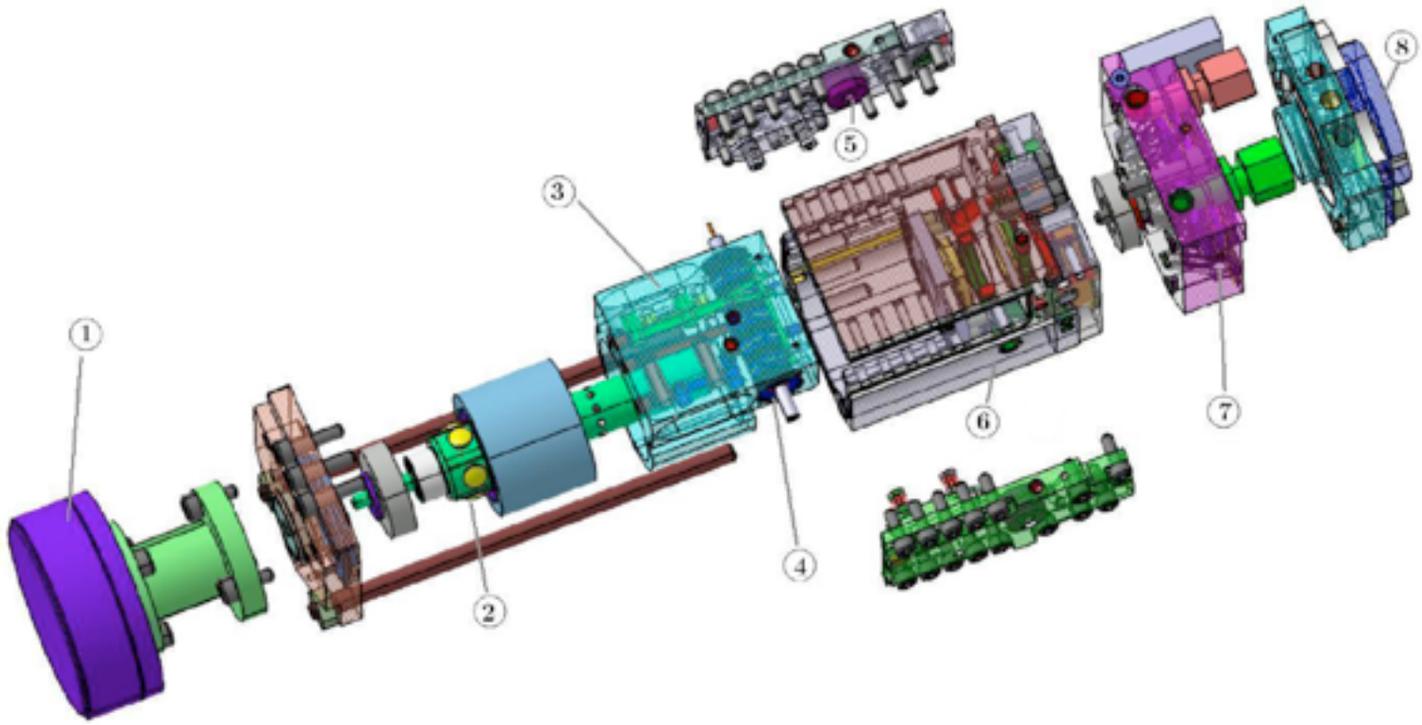
Temps de réponse relativement grand

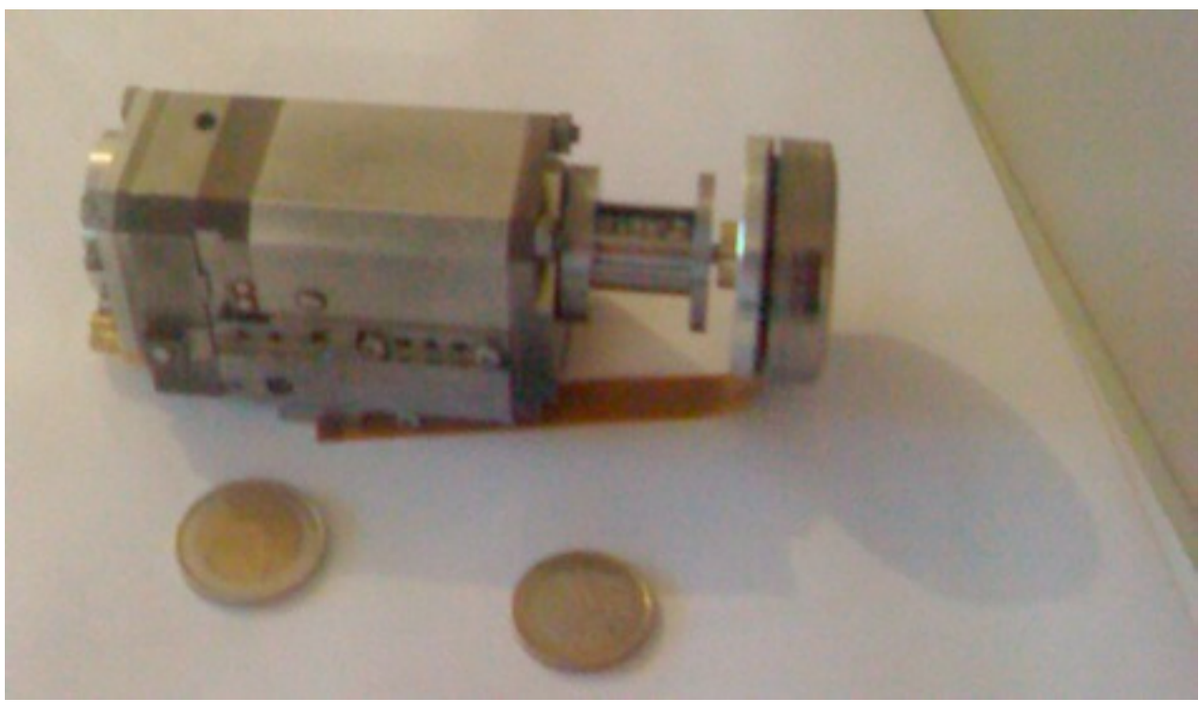


Temps de réponse = 0.1 s

Xmax=1.5 mm

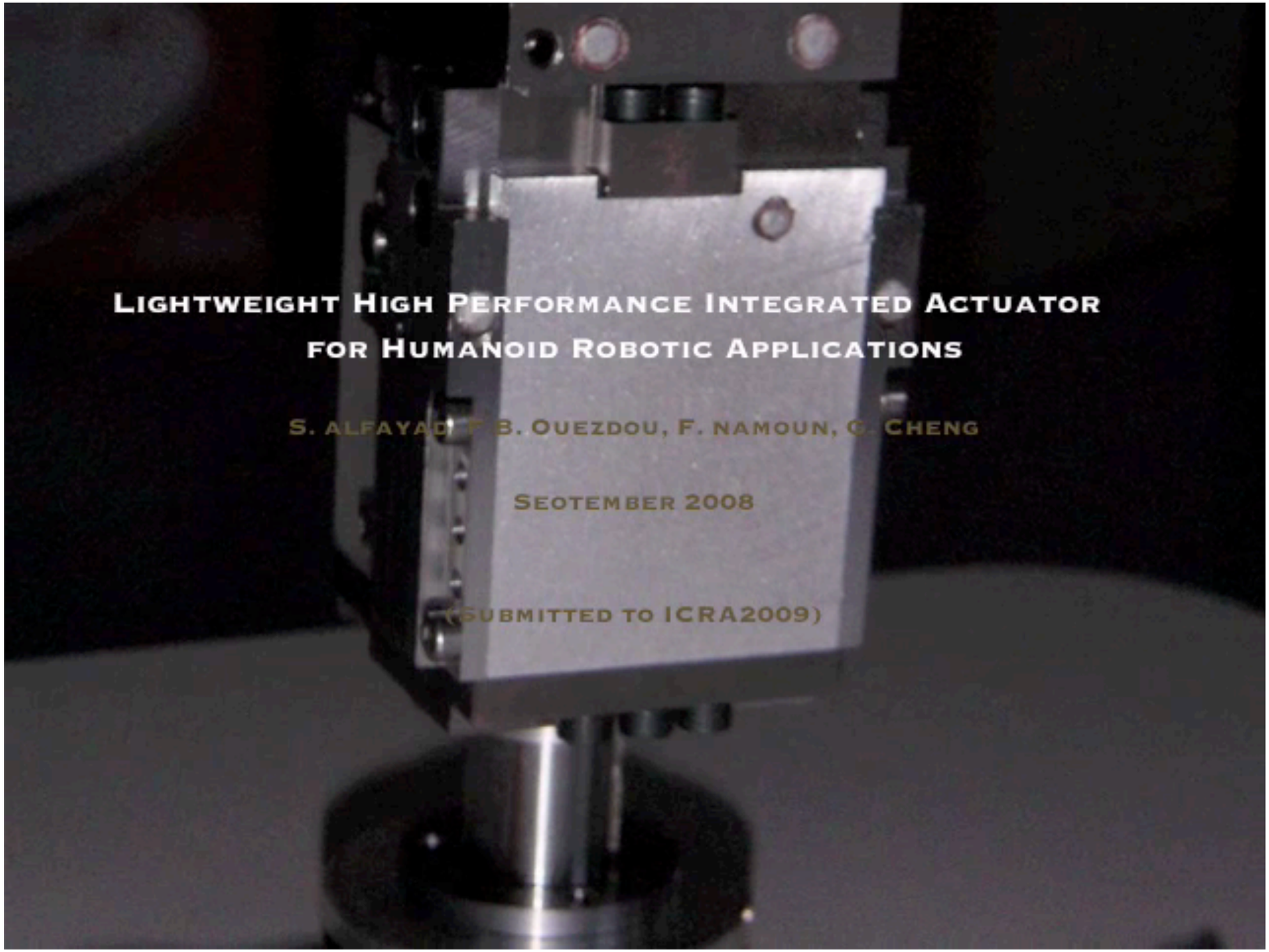
Conception-réalisation





LxWxP mm^3	$80 X 40 X 40$
Poids g	≈ 1000
E mm	± 0.5
N pistons	20
ω tr/mn	3000
Rp mm	1.5
Q Cm^3/min	± 424
P bar	≤ 50

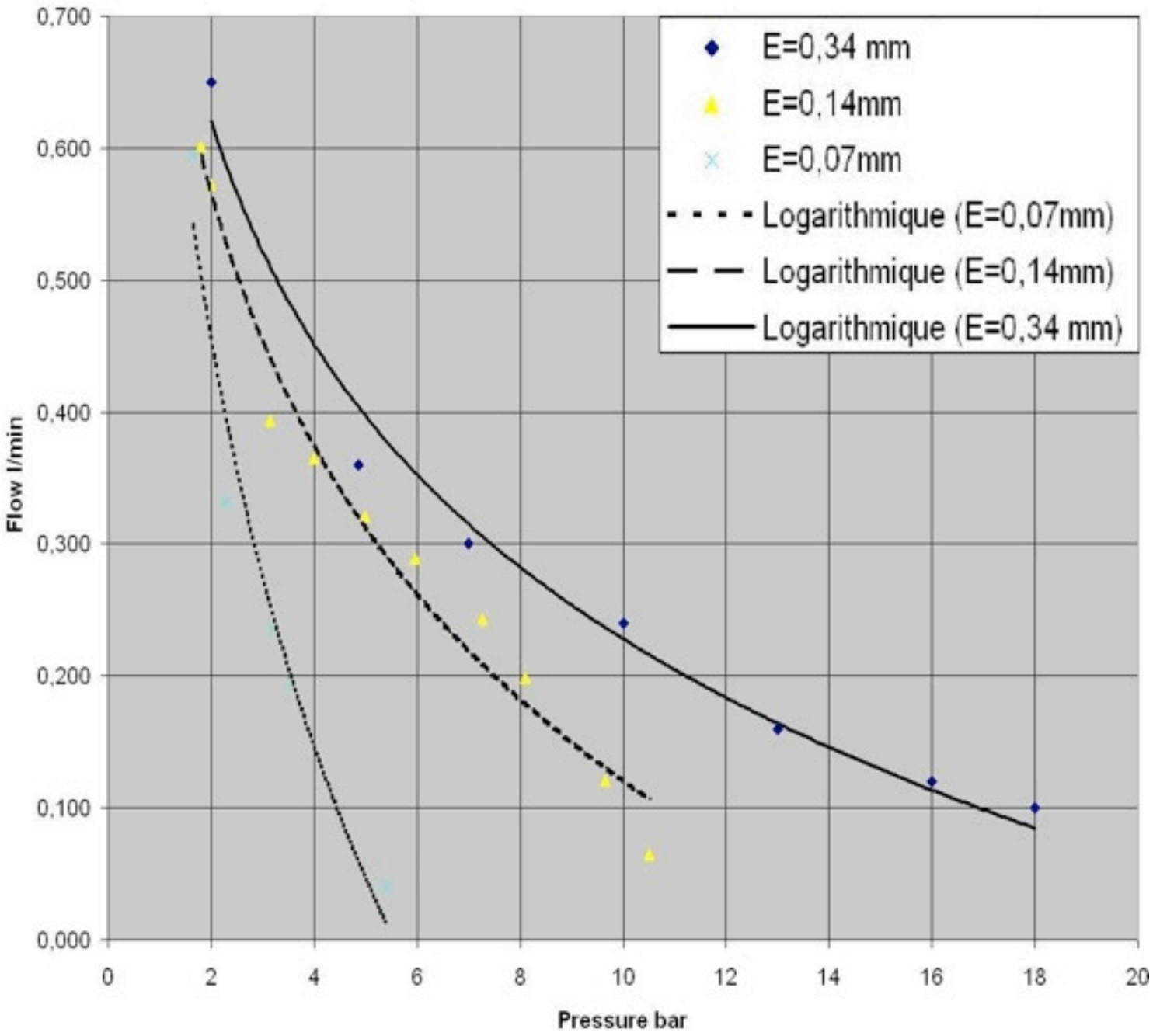
Convertisseur hydraulique
Résultats

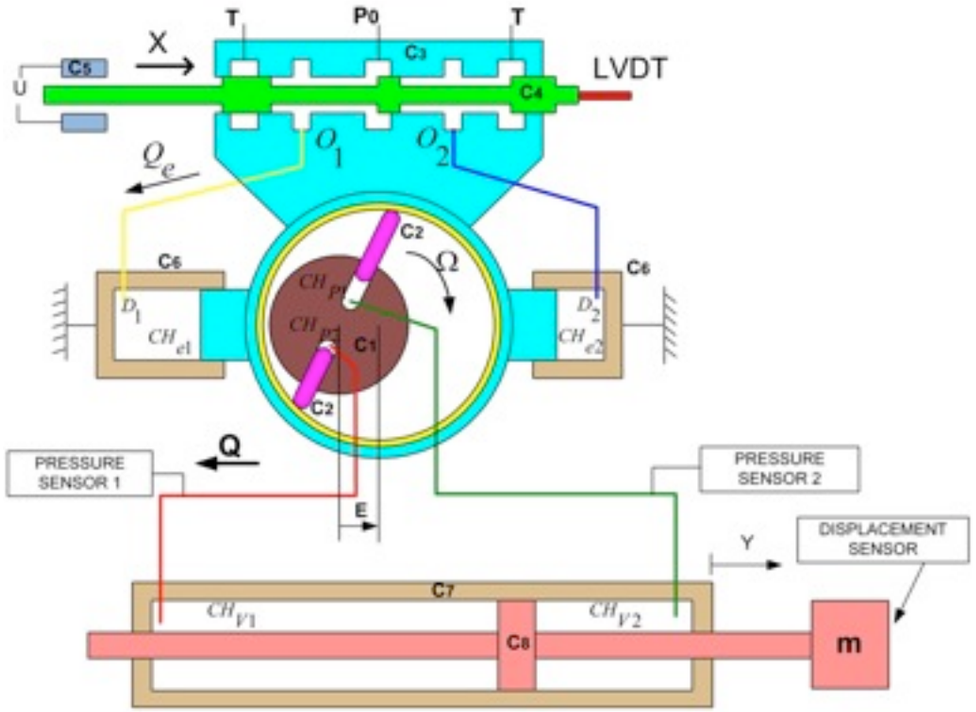


Convertisseur hydraulique
Résultats

Résultats préliminaires

- **Débit vs Pression**





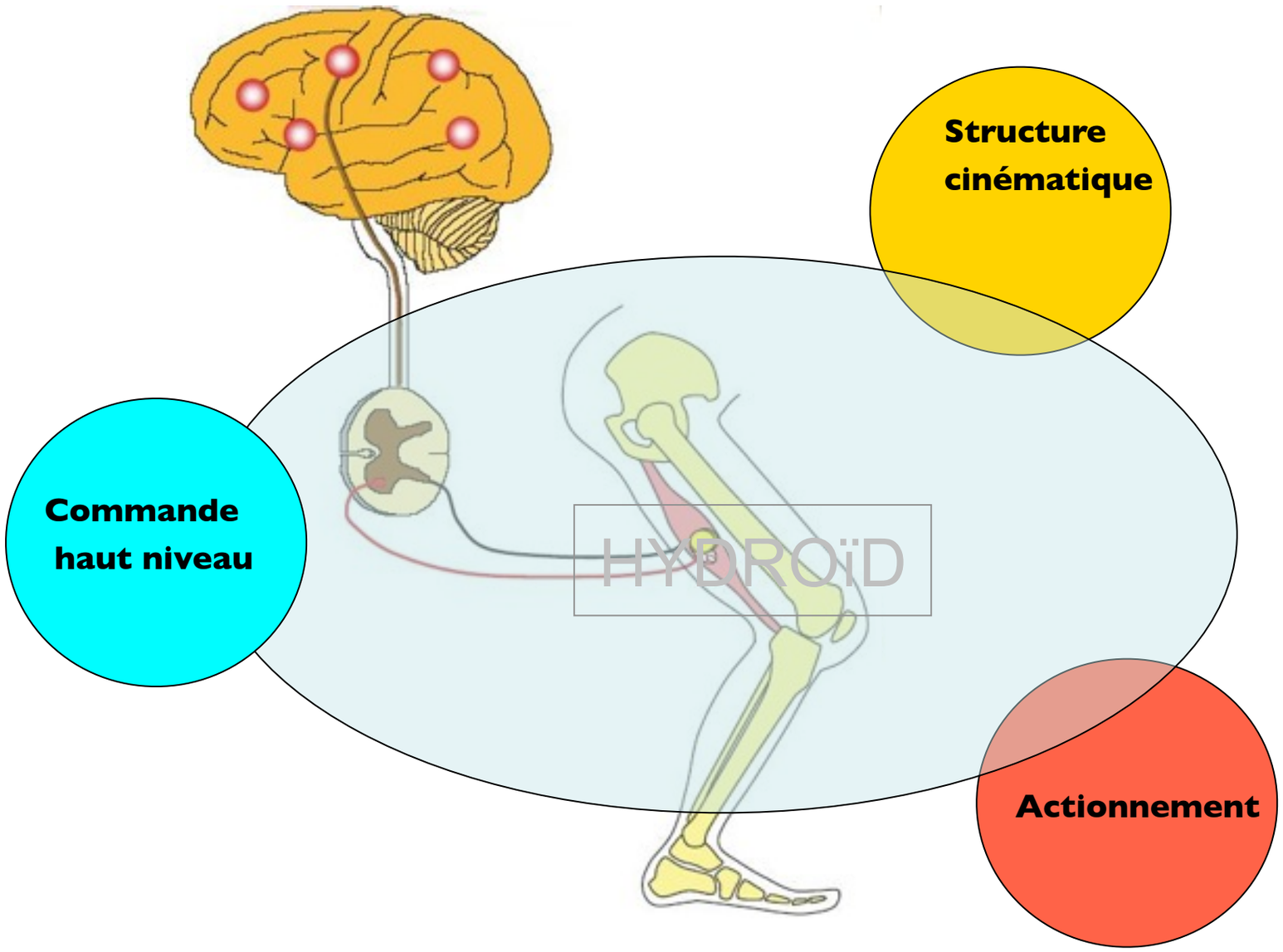
•Rapport de réduction continûment variable

•Optimisation

•Puissance=Cte

- •V grand & F petit
- •F grand & V petit

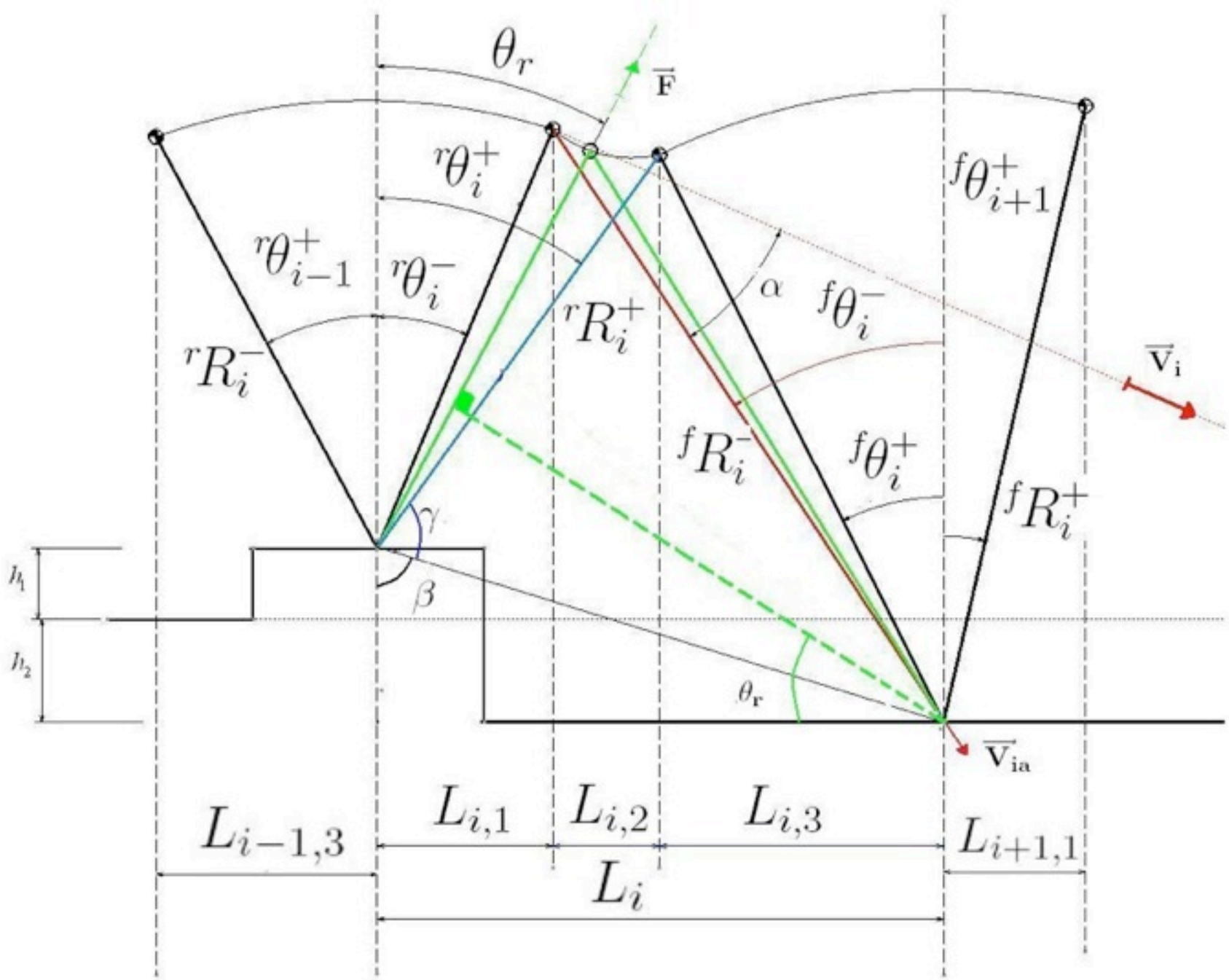
Commande haut niveau



Commande haut niveau

- Planification de trajectoire: relation
  - Longueur de pas
  - Vitesse et trajectoire de CdG
  - Forces propulsives
- Besoins
  - Temps de calcul acceptable (temps réel)
  - Fonction implicite du temps
  - Prédire les n prochains pas
  - Gestion de l'énergie totale
- Difficulté : Modèle dynamique complet très complexe
- Approche proposée: **Energies Moyennes**
- Plans sagittal & frontal avec et sans obstacle

Modèle utilisé



Hypothèses

- Modèle masse concentrée
- jambes sans masse,
- Longueur constante en SS
- Impact mou
- Présence d'obstacles

Conservation énergie totale en SS

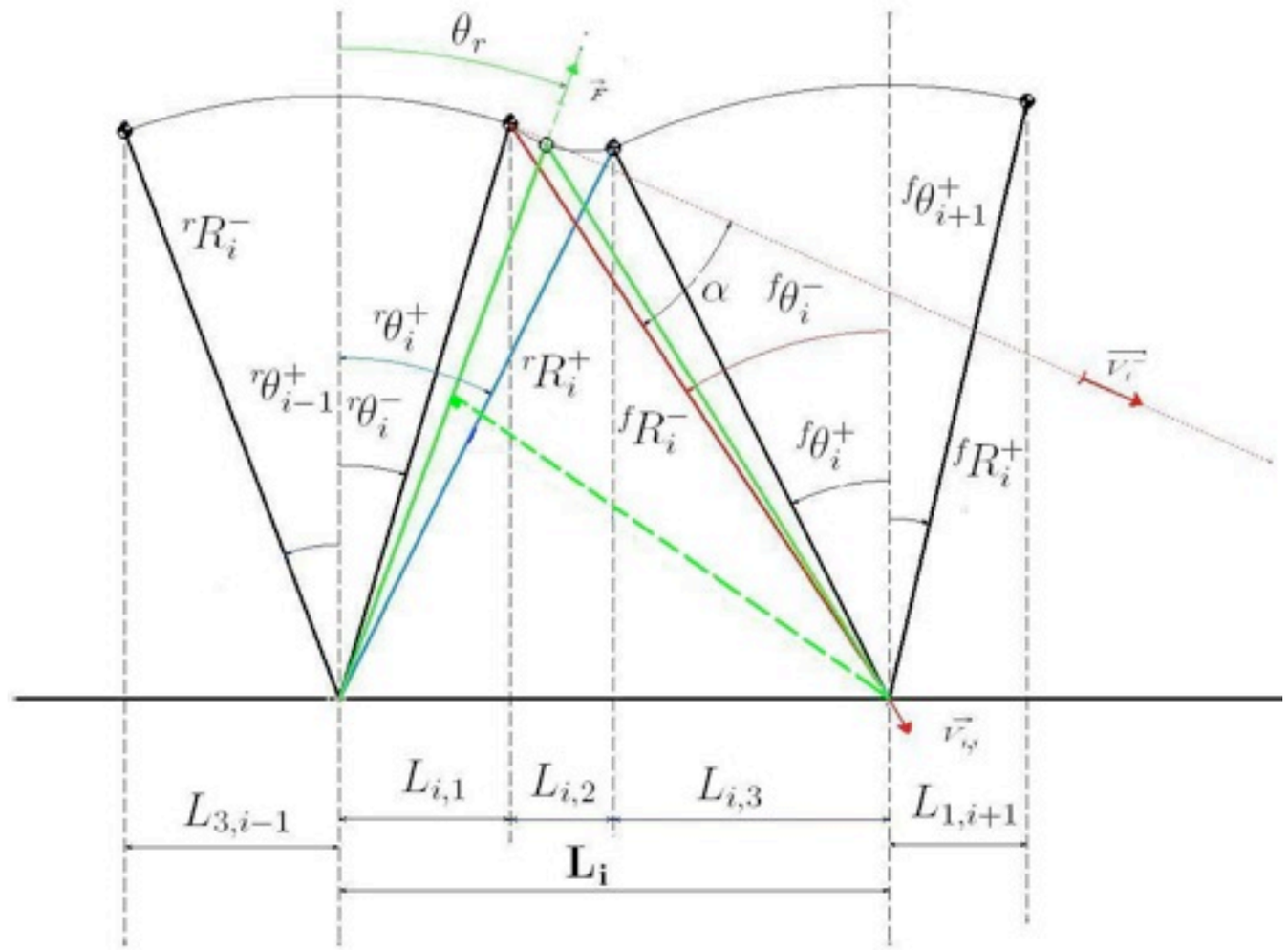
$$E_t(\Theta) = E_p(\Theta) + E_c(\Theta) = C_r^{te}$$

Energies Moyennes

$$\bar{E}_{t,i} = \frac{1}{\Delta\theta_r} \int_{-{}^r\theta_{i-1}^+}^{{}^r\theta_i^-} E_t(\theta_r)\, d\theta_r$$

$$\bar{E}_{p,i} = \frac{1}{\Delta\theta_r} \int_{-{}^r\theta_{i-1}^+}^{{}^r\theta_i^-} E_p(\theta_r)\, d\theta_r$$

$$\bar{E}_{c,i} = \frac{1}{\Delta\theta_r} \int_{-{}^r\theta_{i-1}^+}^{{}^r\theta_i^-} E_c(\theta_r)\, d\theta_r$$

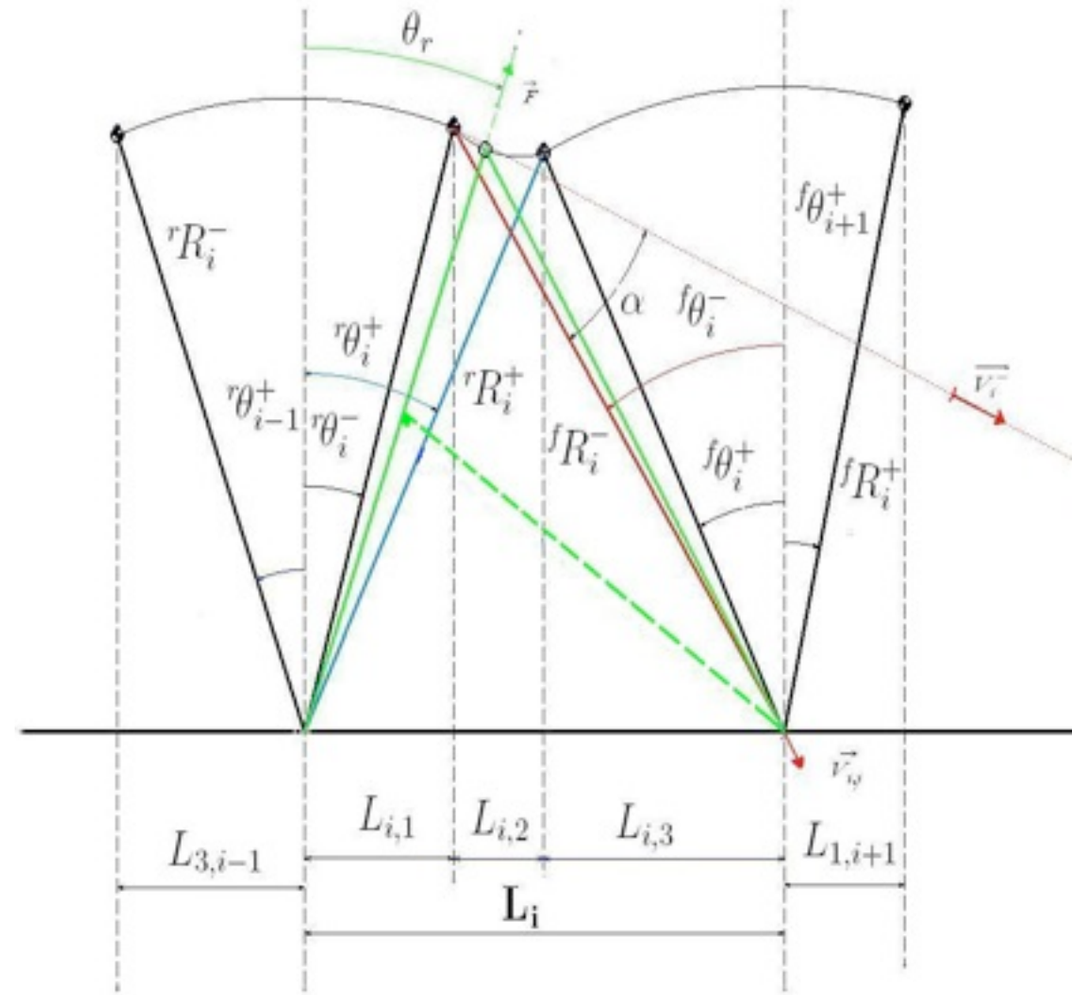


Conservation de l'énergie moyenne

$$\bar{E}_{t,i} = \bar{E}_{p,i} + \bar{E}_{c,i} = C_r^{te}$$

Bilan énergétique entre deux SS

$$\bar{E}_{t,i+1} = \bar{E}_{t,i} - E_{i,i} + \triangle E_{pr,i}$$



$\bar{E}_{t,i}$: Energie totale moyenne en SS 1

$\bar{E}_{t,i+1}$: Energie totale moyenne en SS 2

$E_{i,i}$: Pertes énergétique dûes à l'impact

$\triangle E_{pr,i}$:Apport énergétique durant la phase DS

Bilan énergétique

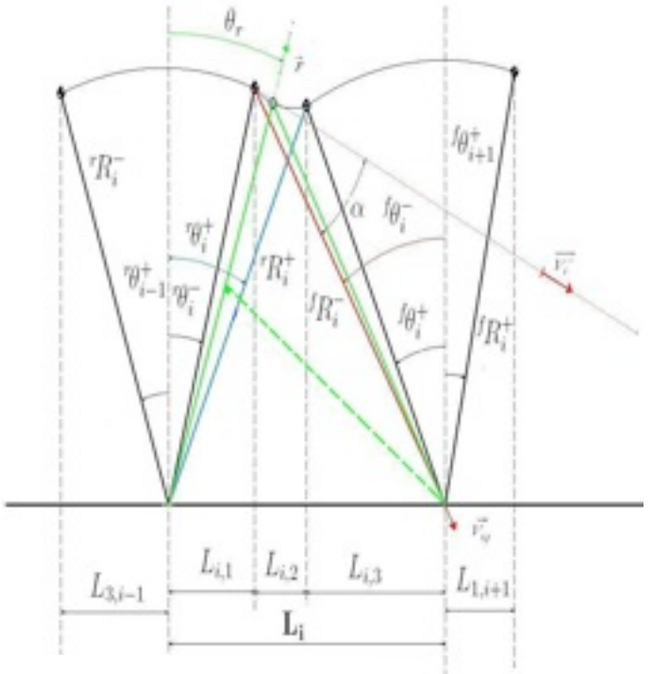
$\bar{E}_{t,i}$

$\bar{E}_{t,i+1}$

$E_{i,i}$

$\triangle E_{pr,i}$

$$\bar{E}_{t,i+1} = \bar{E}_{t,i} - E_{i,i} + \triangle E_{pr,i}$$



$$
\begin{aligned}
{}^{f}R_i^{+}\left[\frac{\sin({}^{f}\theta_{i+1}^{+}) + \sin({}^{f}\theta_{i}^{+})}{{}^{f}\theta_{i+1}^{+} + {}^{f}\theta_{i}^{+}}\right] &= -\frac{1}{2g}\bar{\mathbf{V}}_{\mathbf{i+1}}^{2} + \frac{1}{2g}\bar{\mathbf{V}}_{i}^{2}\cos({}^{r}\theta_{i}^{-} + {}^{f}\theta_{i}^{-})^{2} \\
&+ {}^{r}R_i^{-}\left[\frac{\sin({}^{r}\theta_{i}^{-}) + \sin({}^{r}\theta_{i-1}^{+})}{{}^{r}\theta_{i}^{-} + {}^{r}\theta_{i-1}^{+}}\right]\cos({}^{r}\theta_{i}^{-} + {}^{f}\theta_{i}^{-})^{2} \\
&+ \frac{\bar{F}_i\mathbf{L_i}}{mg}\left[\sin({}^{r}\theta_{i}^{+}) - \sin({}^{r}\theta_{i}^{-})\right] \\
&+ {}^{r}R_i^{-}\cos({}^{r}\theta_{i}^{-})\sin({}^{r}\theta_{i}^{-} + {}^{f}\theta_{i}^{-})^{2}
\end{aligned}
$$

Eq.1

Résolution

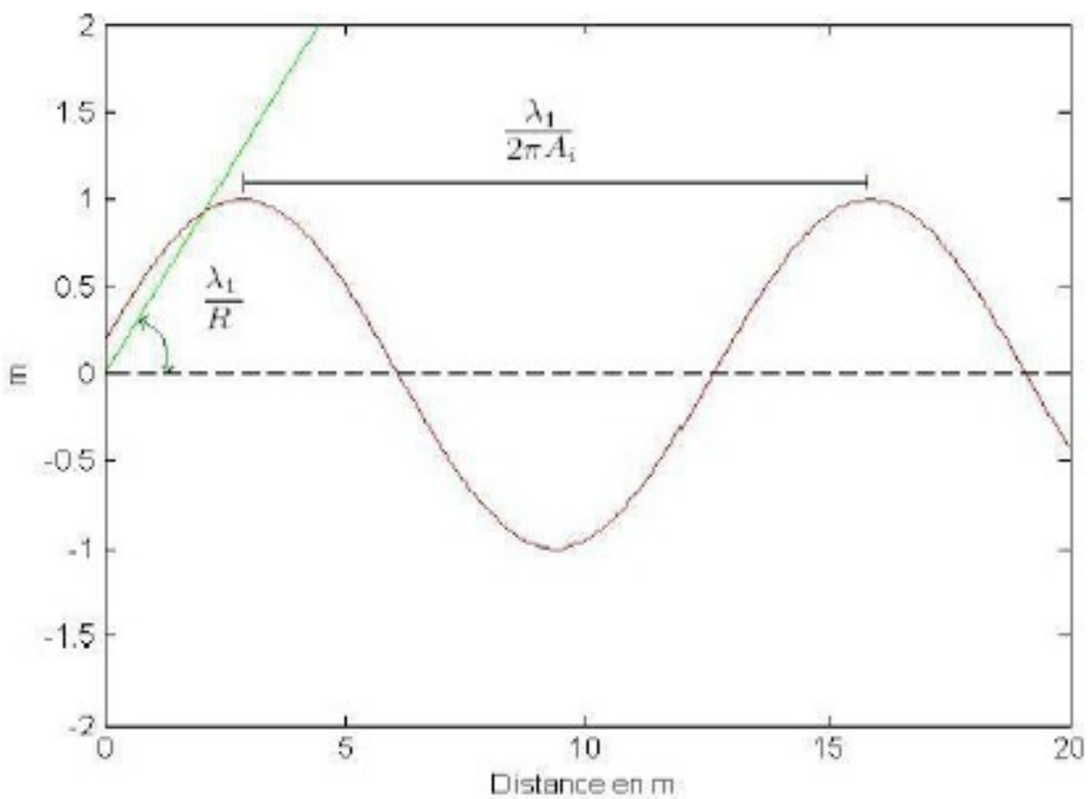
Propriétés Géométriques → **Eq.1** →

$$\frac{\lambda_1 \mathbf{L_{i+1}} + \lambda_3 \mathbf{L_i}}{\arcsin(\frac{\lambda_1 \mathbf{L_{i+1}}}{R}) + \arcsin(\frac{\lambda_3 \mathbf{L_i}}{R})} = A_i(\mathbf{L_{i-1}}, \mathbf{L_i}, \overline{\mathbf{F}}_\mathbf{i}, \bar{\mathbf{V}}_\mathbf{i}, \bar{\mathbf{V}}_\mathbf{i+1})$$

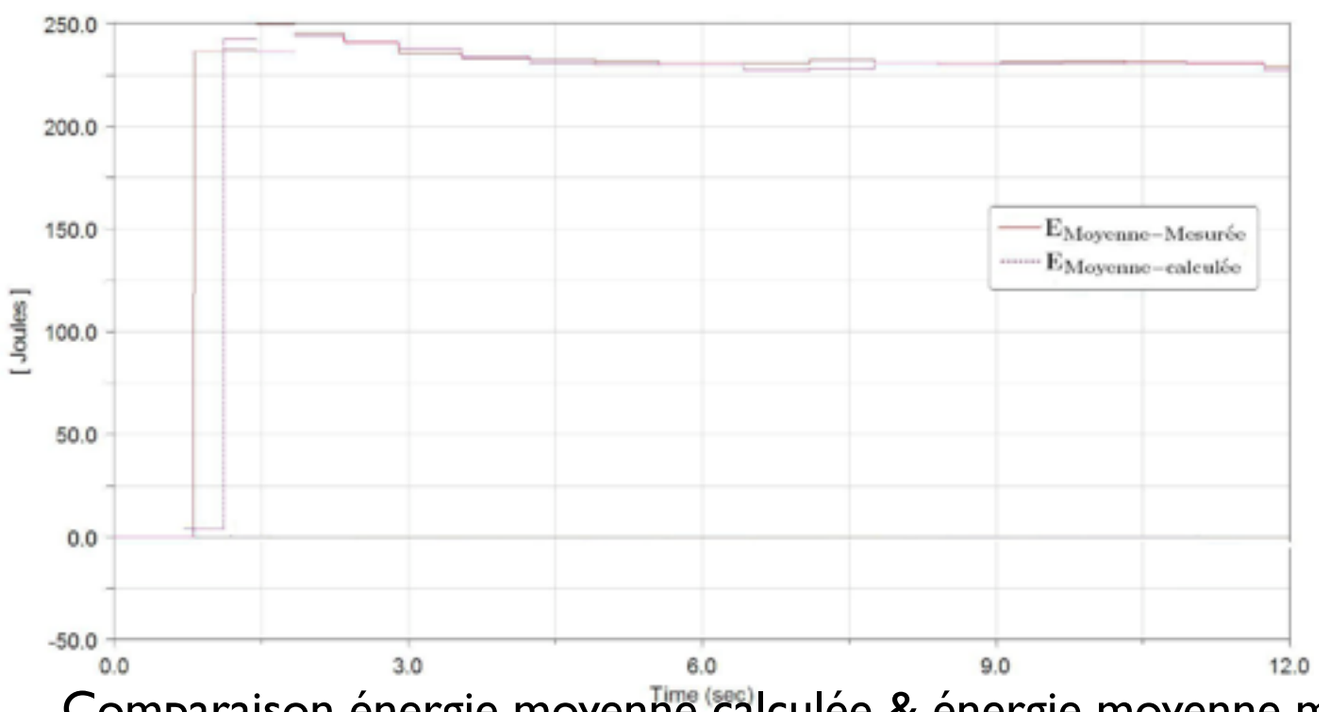
$$\sin\left(\frac{\lambda_1 \mathbf{L_{i+1}} + \lambda_3 \mathbf{L_i} - A_i(\mathbf{L_{i-1}}, \mathbf{L_i}, \overline{\mathbf{F}}_\mathbf{i}, \bar{\mathbf{V}}_\mathbf{i}, \bar{\mathbf{V}}_\mathbf{i+1}) \arcsin(\frac{\lambda_3 \mathbf{L_i}}{R})}{A_i(\mathbf{L_{i-1}}, \mathbf{L_i}, \mathbf{F}_\mathbf{i}, \bar{\mathbf{V}}_\mathbf{i}, \bar{\mathbf{V}}_\mathbf{i+1})}\right) = \frac{\lambda_1 \mathbf{L_{i+1}}}{R}$$

Longueur de pas solution de :

$$\boxed{\sin(\frac{\lambda_1 x + \beta_i}{A_i}) = \frac{\lambda_1 x}{R}}$$



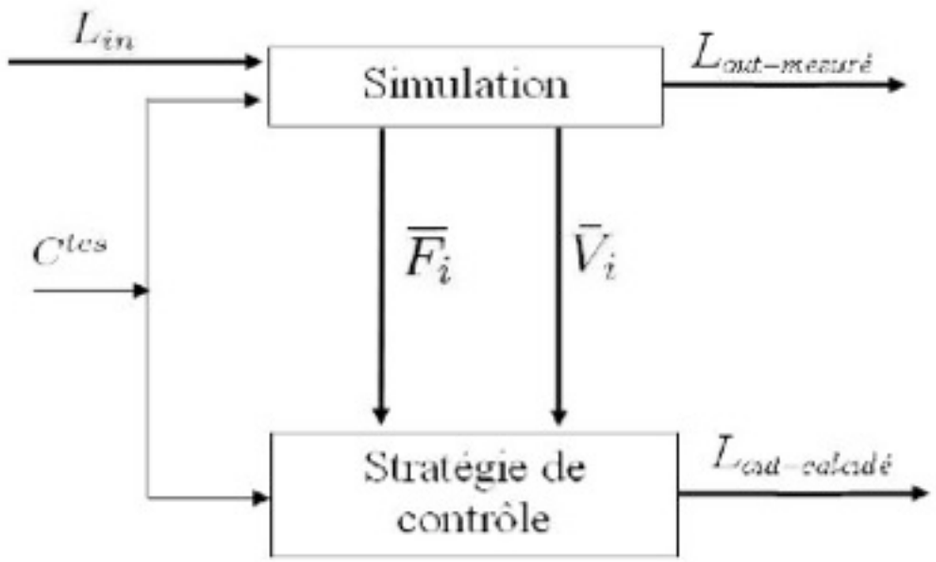
Résultats préliminaires

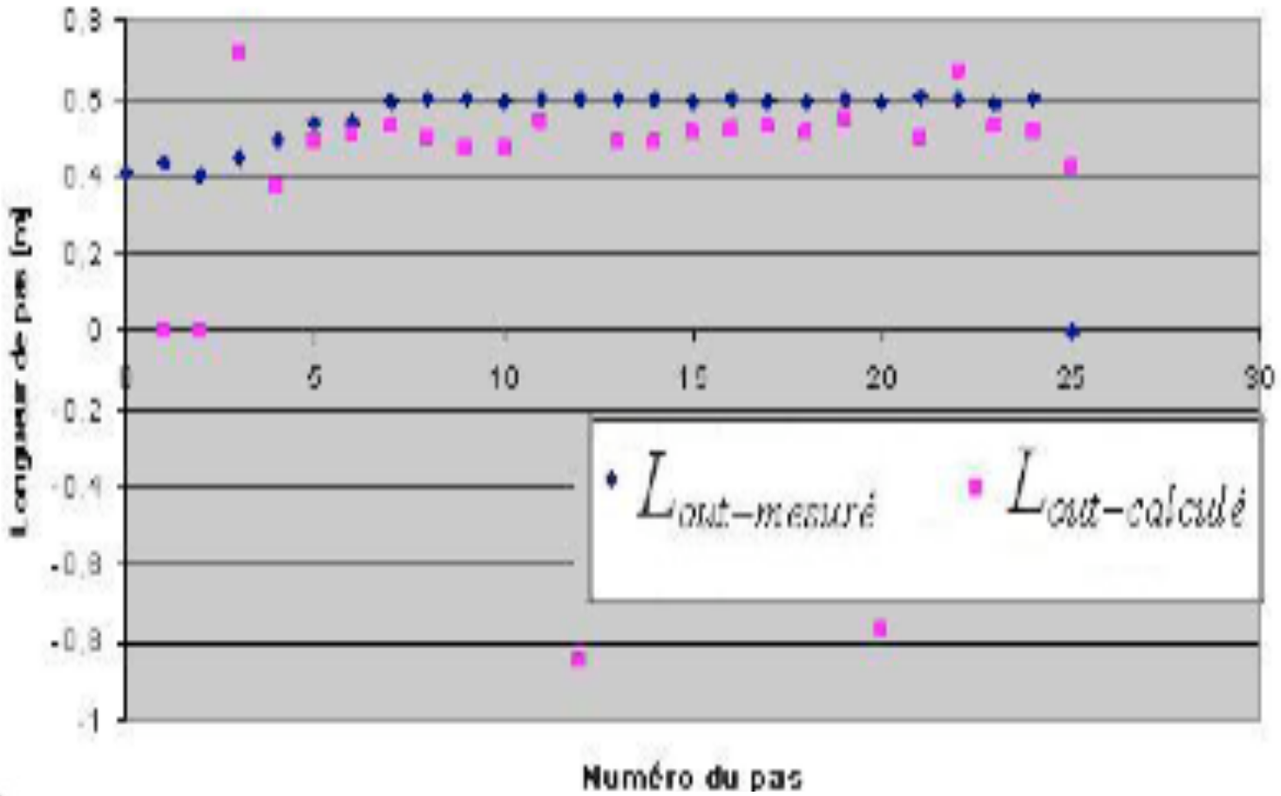


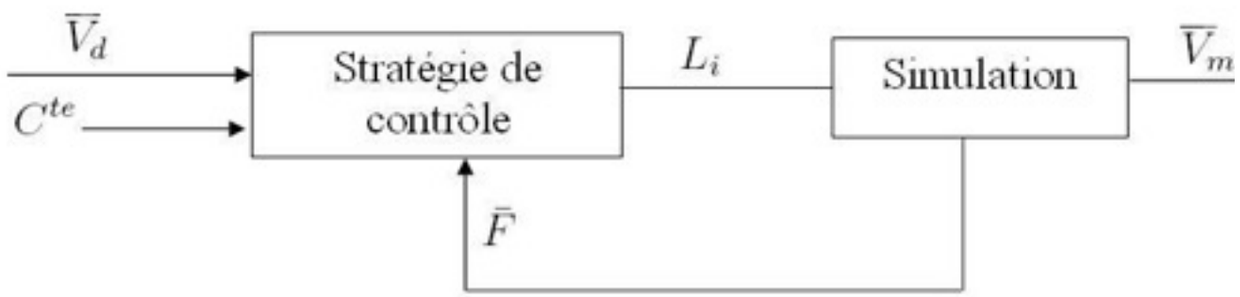
Erreur relative $\leq 10\%$

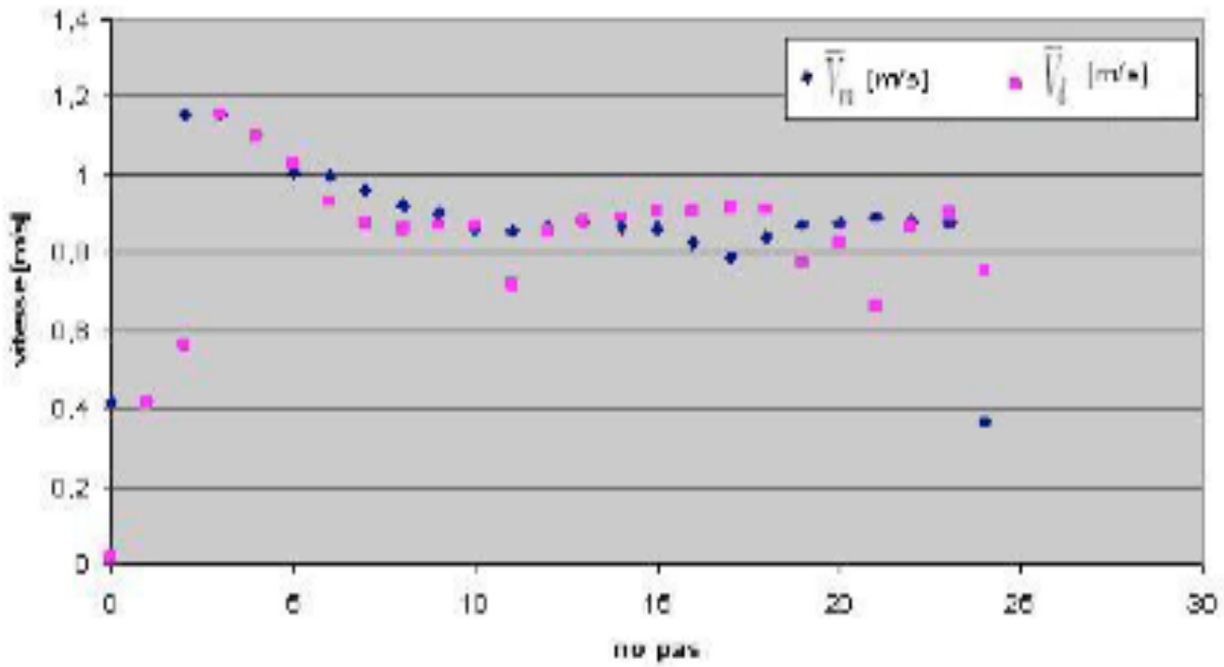
Comparaison énergie moyenne calculée & énergie moyenne mesurée

Résultats préliminaires









Erreur relative ≤10%

Conclusions

•Structure cinématique HYDROïD

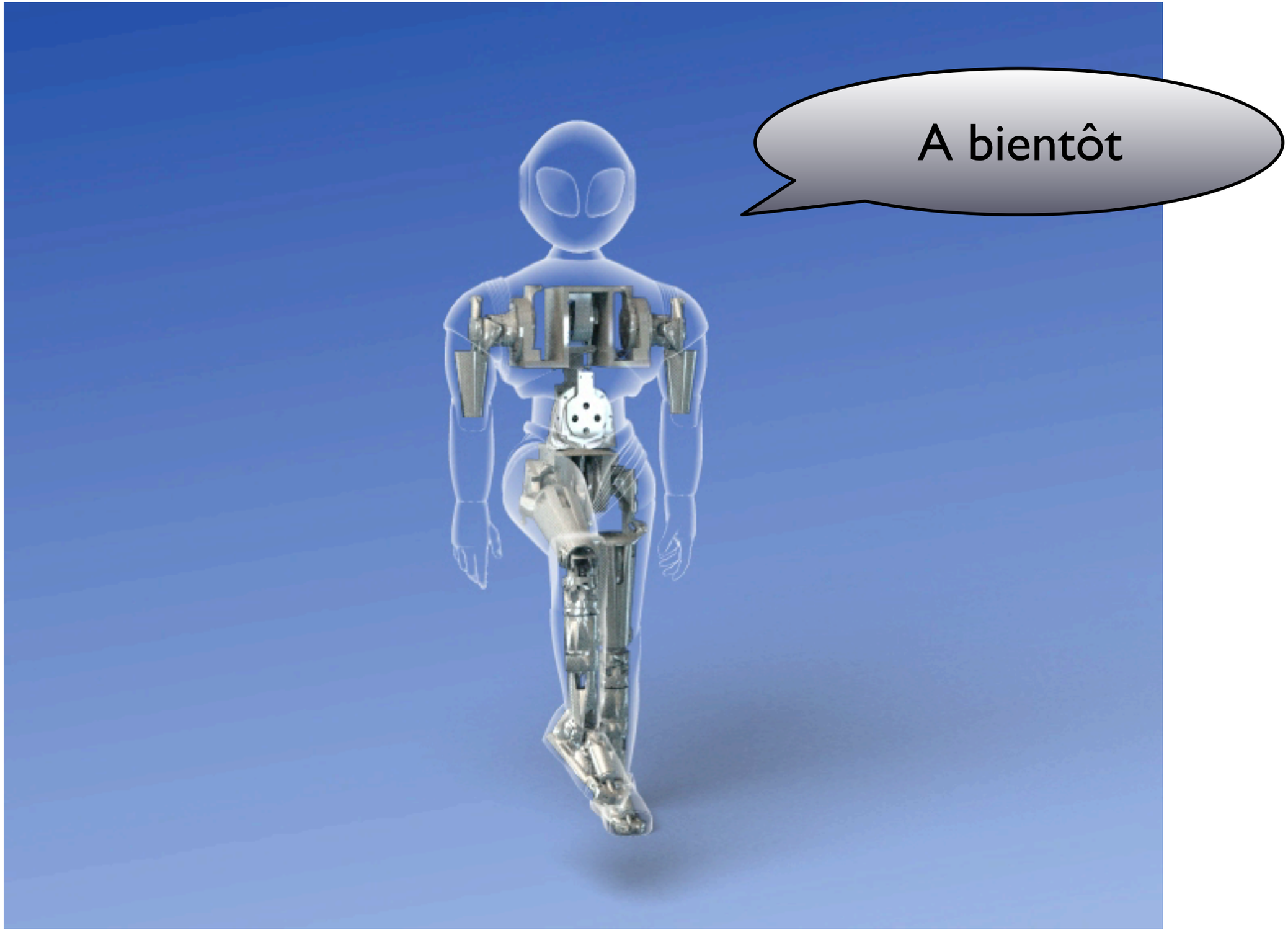
- Analyse des Mesures biomécaniques, ddl, Débattements, Vitesses, Couples
- Un pied actif proposé, jambe à 8ddl actifs
- ***Deux mécanismes sphériques hybrides modulaires (Hanche & Cheville)***
- Modèles & outils de simulation
- Partie inférieure réalisée et testée

•Actionnement

- ***Actionnement hydraulique intégré***
- Principe de fonctionnement
- ***Rapport de réduction continûment variable***
- Loi entré/sortie (« jerk »)
- Simulation : temps de réponse 100 ms
- ***Prototype réalisé (orteil): 80x40x40 mm^3, 50 bars.***
- ***Performances prometteuses: déplacement 38kg à 2cm/s***

•Stratégie de contrôle énergétique

- Relation prédictive simple (Sagittal & Frontal) avec & sans obstacle
- Dépendance implicite de temps
- ***Prédiction des longueurs des pas suivants***
- Validation (en simulation) plan sagittal, erreur max 10%



Merci à : F.B. Ouezdou, LISV & BIA