

Projet BIP 2000

Synthèse de la marche



G. Bessonnet

Institut P' (LMS), Université de Poitiers, France

Origine du projet BIP

- Premiers contacts

- Juin 94 à Poitiers (JNRR)
- Automne 94 à Grenoble

- Laboratoires participants

- INRIA-RA, équipe BIP de Bernard
- LMS Poitiers, équipe Mécanismes et robotique
- (LAG Grenoble, recentré sur 'Rabbit' en 97)

- Démarrage du projet au LMS

Hiver 95-96 après réinstallation sur le site du Futuroscope



SP2MI, LMS, Futuroscope

Objectifs

- Construire un bipède à **cinématique articulaire** proche de celle du **système locomoteur humain**
- Modéliser la dynamique de la marche
- Implémenter des lois de commande



INRIA-RA 1999

Organisation du projet

LMS (mécaniciens)

- Conception mécanique et réalisation du système locomoteur
- Synthèse numérique de la marche

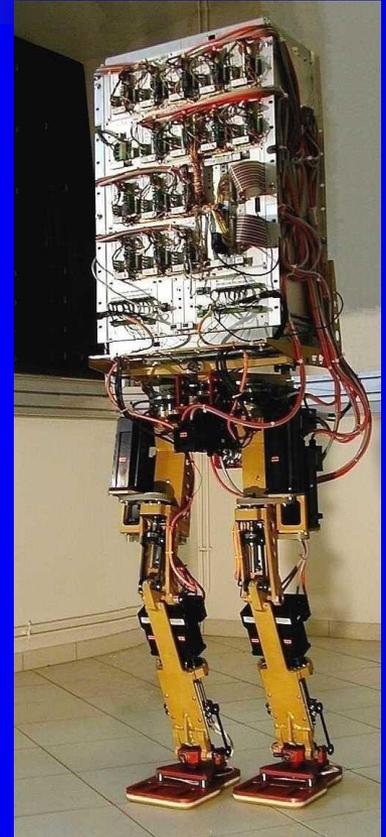
INRIA-RA (automaticiens)

- Conception et montage de l'électronique de commande
- Implémentation de lois de commande
- Essais

Architecture cinématique du bipède

- **Hanche:** liaison 3 axes
- **Genou:** axe simple
- **Cheville:** liaison 2 axes
- **Pelvis-tronc:** liaison 3 axes

=> 15 degrés de liberté internes,
tous actionnés



Taille: 1,8m
Poids: 107kg

Réalisation du bipède : LMS

- Conception, construction et essais d'une **jambe prototype**: LMS, 96-97



- Construction du **système locomoteur et du pelvis**: LMS, 98-99



Philippe Sardain

Assemblage et essais : INRIA-RA

- Instrumentation, câblage: INRIA 99-00
- Essais de marche sagittale: INRIA 2000
- Essais de validation et d'équilibration du bipède complet: INRIA 2000



Synthèse dynamique de la marche

Dynamical synthesis of bipedal walking

Objectif :

Coordination globale des mouvements articulaires pour une marche efficace et stable.

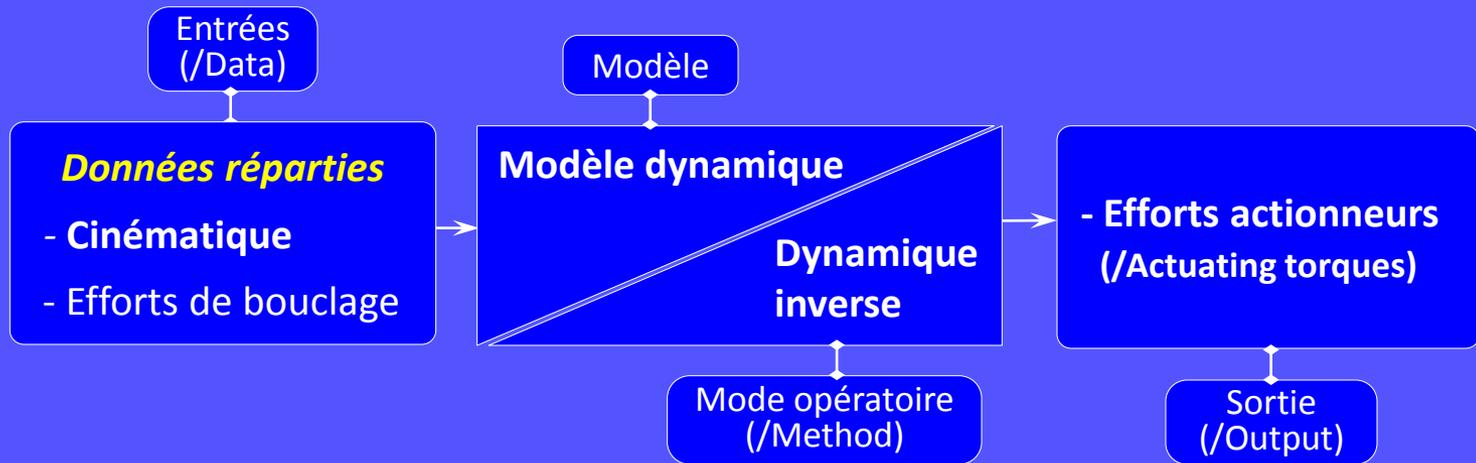
- **Pascal Seguin, 2003**

Sagittal gait, 7 dof

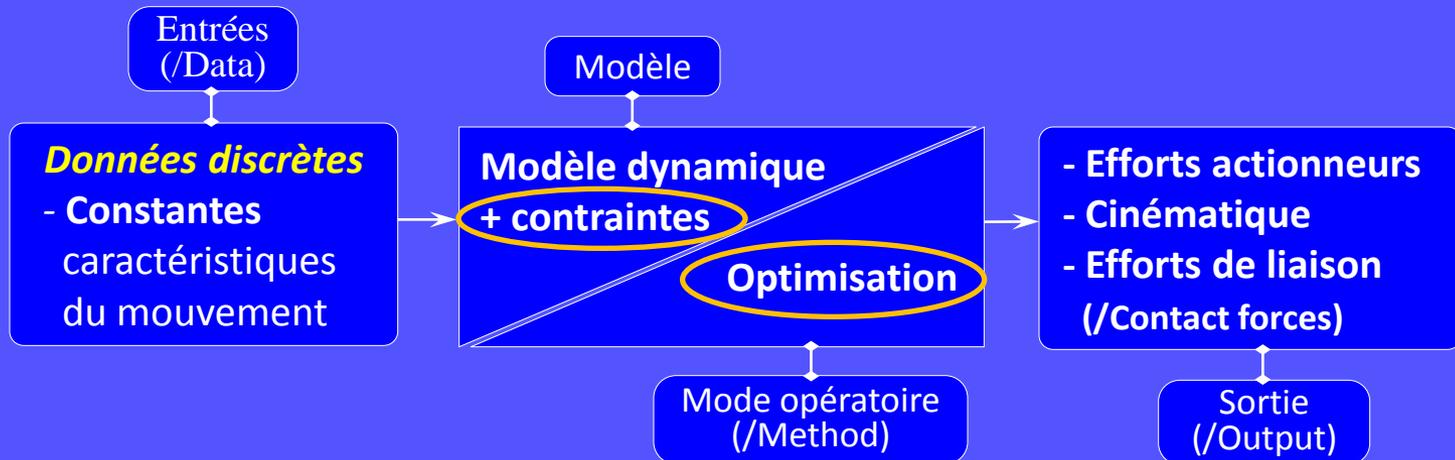
- **Jérôme Marot, 2007**

3D-gait, 12, 14 dof

Analyse dynamique (inverse)



Synthèse dynamique



Main points of the optimization problem

1 - Modèle dynamique

$$t \in I_k, \mathbf{L}(\mathbf{q}(t), \dot{\mathbf{q}}(t), \ddot{\mathbf{q}}(t)) = \boldsymbol{\tau}(t) + [\mathbf{J}^T(\mathbf{q}(t)) \boldsymbol{\lambda}(t)]$$

(équation d'état, ou contrainte différentielle)

2 - Contraintes

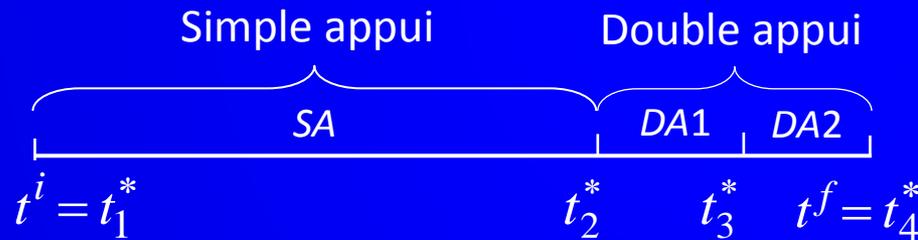
- permanentes (réparties dans la durée)
- instantanées

3 - Critère à minimiser

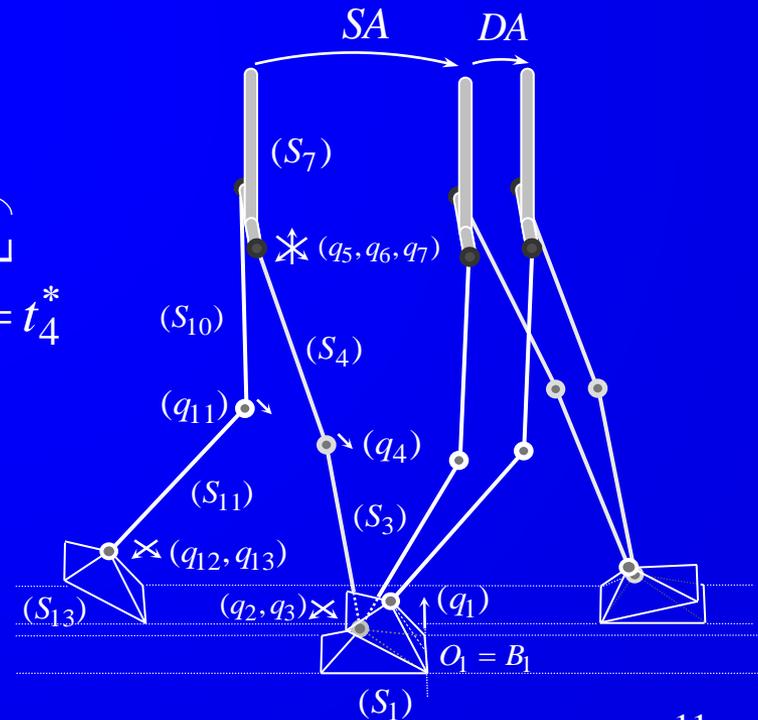
- Minimisation de l'effort ou du travail

Structure d'un pas de marche: phases d'appui

Pas de marche (Gait step)	{ Simple appui (Single support)	1 – Phase pied à plat
		{ Double appui (Double support)



Mouvement multi-phases
avec multi-appuis



Contraintes permanentes (Permanent Constraints)

1 - Contraintes d'appui (Constraints of contact)

- Localisation des centres d'appui (Location of ZMPs)
- Unilatéralité des contacts (One-sided contacts)
- Non glissement (Non-sliding conditions)

$$t \in I_k, C^a(q(t), \dot{q}(t), \ddot{q}(t), \tau(t), \lambda(t)) \leq 0 \quad (\in \mathcal{R}^{n_a})$$

2 - Contraintes de non-collision (Non-collisional constraints)

$$t \in I_k, C^{nc}(q(t)) \leq 0 \quad (\in \mathcal{R}^{n_{nc}})$$

3 - Contraintes de « boîte » (Box constraints)

$$t \in I, \begin{cases} q^{\min} \leq q(t) \leq q^{\max} \\ \dot{q}^{\min} \leq \dot{q}(t) \leq \dot{q}^{\max} \\ \tau^{\min} \leq \tau(t) \leq \tau^{\max} \end{cases}$$

Critère(s) de performance

1 - Critère énergétique: minimization of actuating work

$$J_e = \int_{t^i}^{t^f} \sum_{i=n_e+1}^{n_q} |\dot{q}_i(t) \tau_i(t)| dt$$

- Couples actionneurs à variations «bang-off-bang»

2 - Critère sthénique: minimization of actuating torques

$$J_s = \int_{t^i}^{t^f} \tau(t)^T D_\tau \tau(t) dt + \int_{t_2^*}^{t^f} \lambda(t)^T D_\lambda \lambda(t) dt$$

- Couples actionneurs réguliers à pics de valeurs réduits

Mode opératoire: Optimisation paramétrique

Approche 1 (Seguin 2003): paramétrisation des q_i
(et des \dot{q}_i et \ddot{q}_i)

- Grande souplesse de mise en œuvre
- Résolution en τ et λ de l'équation:

$$t \in I_k, \mathbf{L}(q(t), \dot{q}(t), \ddot{q}(t)) = \boldsymbol{\tau}(t) + [\mathbf{J}^T(q(t)) \boldsymbol{\lambda}(t)]$$

par pseudo-inversion.

Approche 2 (Marot 2007): paramétrisation des q_i et des λ_j
(et des \dot{q}_i et \ddot{q}_i)

- Pas de pseudo-inversion (formulation lagrangienne pas nécessaire)
- Introduction de paramètres de forme supplémentaires

Formulation du problème d'optimisation paramétrique

Step 1: paramétrisation des fonctions q, λ, τ

- Valeurs nodales des q_i (et de leurs dérivées)

$$\mathbf{X} = ((X^1)^T, \dots, (X^{n_q})^T)^T \quad \Rightarrow \quad q(t) \cong Q(\mathbf{X}, t)$$

- Valeurs nodales des λ_j

$$\mathbf{Y} = ((Y^1)^T, \dots, (Y^{n_\lambda})^T)^T \quad \Rightarrow \quad \lambda(t) \cong \Lambda(\mathbf{Y}, t)$$

- Motion equations yield $\Rightarrow \tau(t) \cong T(\mathbf{X}, \mathbf{Y}, t)$

- Durées des sous-phases

$$\mathbf{Z} = (z_1, z_2, z_3)^T \quad (\equiv (t_2^* - t_1^*, t_3^* - t_2^*, t_4^* - t_3^*)^T)$$

Step 2: conversion du critère

$$J \cong F(\mathbf{X}, \mathbf{Y}, \mathbf{Z}) := \sum_{k=1}^3 \int_{t_k^*(\mathbf{Z})}^{t_{k+1}^*(\mathbf{Z})} L_k(\mathbf{X}, \mathbf{Y}, t) dt$$

Step 3: removing the time from constraints

- Par discrétisation

$$\begin{array}{l} C^e(\mathbf{X}, \mathbf{Y}, t) = 0 \quad (\in \mathcal{R}^{n_e}) \\ C^i(\mathbf{X}, \mathbf{Y}, t) \leq 0 \quad (\in \mathcal{R}^{n_i}) \end{array} \implies 1 \leq k \leq N, \begin{cases} C^e(\mathbf{X}, \mathbf{Y}, t_k(\mathbf{Z})) = 0 \\ C^i(\mathbf{X}, \mathbf{Y}, t_k(\mathbf{Z})) \leq 0 \end{cases}$$

- Par pénalisation

- Fonctions de transgression des contraintes inégalités

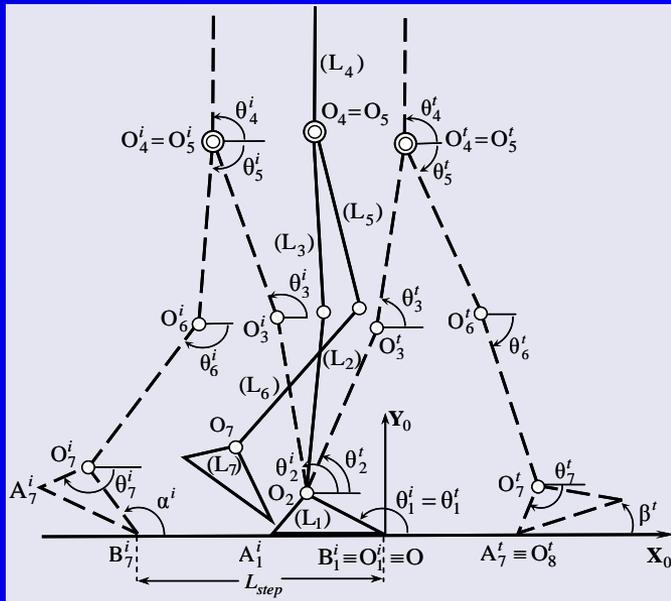
$$C_i^+(\mathbf{X}, \mathbf{Y}, t) = \underset{t \in I_k}{\text{Max}}(0, C_i(\mathbf{X}, \mathbf{Y}, t))$$

- Critère augmenté

$$\begin{aligned} F_r(\mathbf{X}, \mathbf{Y}, \mathbf{Z}) = & F(\mathbf{X}, \mathbf{Y}, \mathbf{Z}) \\ & + r_i \sum_{k=1}^3 \int_{t_k^*(\mathbf{Z})}^{t_{k+1}^*(\mathbf{Z})} (C_i^+(\mathbf{X}, \mathbf{Y}, t))^T C_i^+(\mathbf{X}, \mathbf{Y}, t) dt \\ & + r_e \sum_{k=1}^3 \int_{t_k^*(\mathbf{Z})}^{t_{k+1}^*(\mathbf{Z})} (C_e(\mathbf{X}, \mathbf{Y}, t))^T C_e(\mathbf{X}, \mathbf{Y}, t) dt \end{aligned}$$

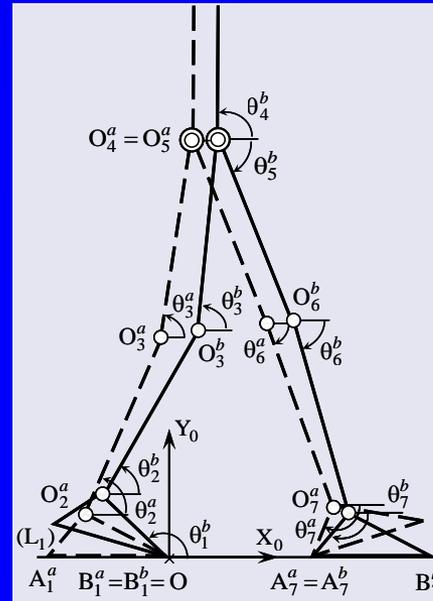
Résultat 1: marche sagittale (Seguin 2003)

Single support

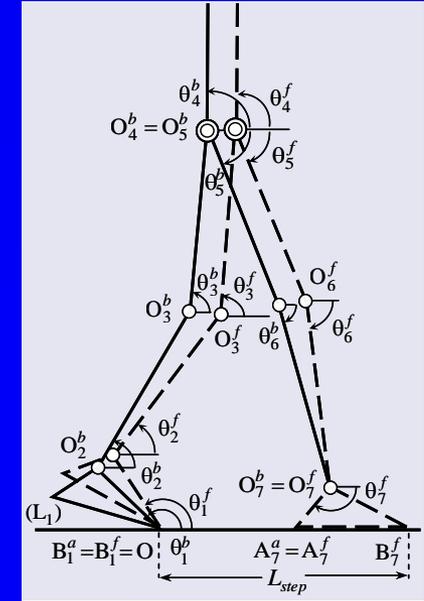


Le pied porteur reste à plat

Double support: two sub-phases

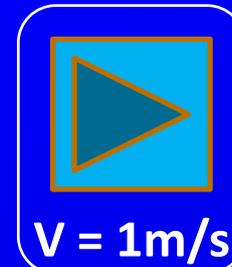


Mouvement d'abattée du pied avant

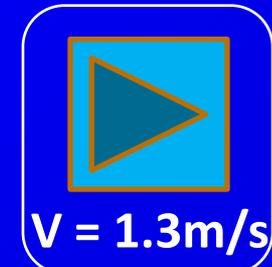


Pied avant maintenu à plat.

- Trois sous-phases
- Paramétrisation des q_i seuls, splines C3
- Extraction des τ_i et λ_j par pseudo-inversion

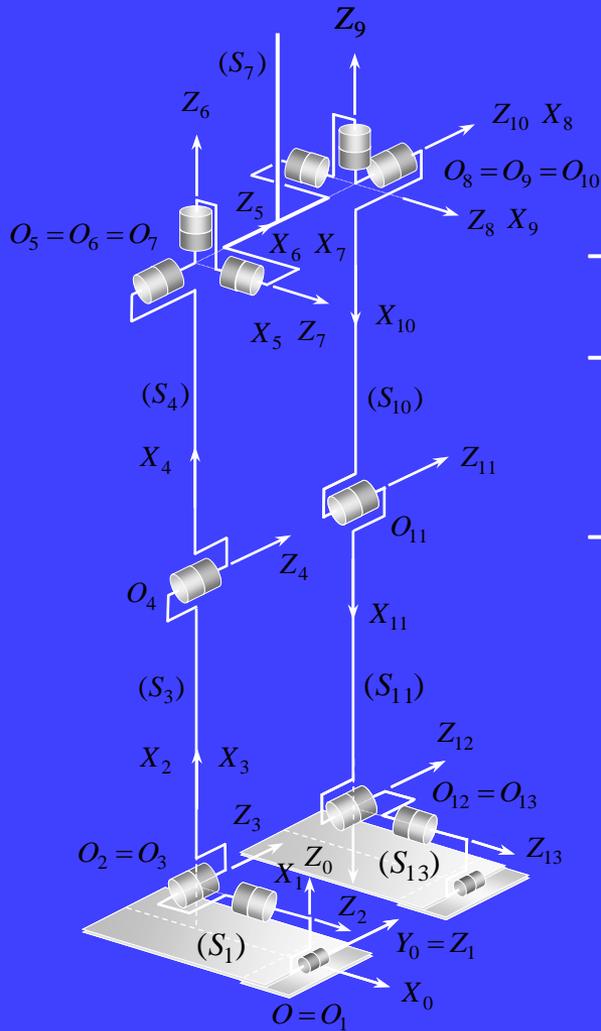


$V = 1\text{m/s}$



$V = 1.3\text{m/s}$

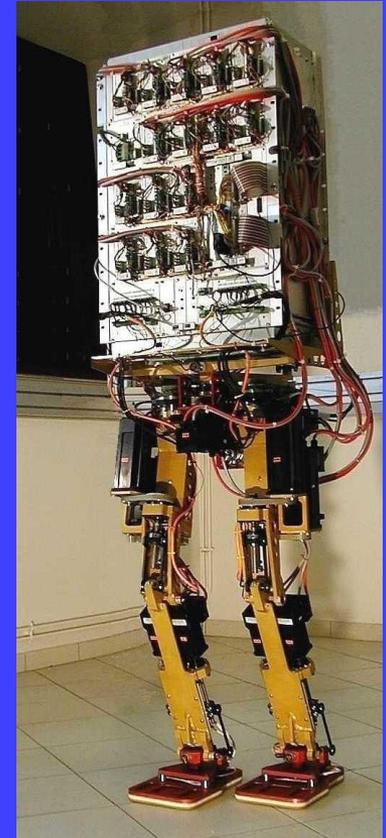
Résultat 2: marche 3D (Marot 2007)



- Trois sous-phases
- Paramétrisation des q_i (splines C3) et des λ_i (splines C0)
- τ_i obtenus par dynamique inverse


V = 0.7 m/s


V = 1.25 m/s



Modèle segmentaire à 12+2
 mobilités du système locomoteur

Ce qu'il restait à faire

- Splines de classe C^1 ($/C^0$) pour les λ_j
 - Liaison pelvis-tronc (et bras en contre-balancement)
 - Introduire un paramétrage des \dot{q}_i
-
- Introduction de frottements articulaires
 - Synthèse de pas variés:
 - pas avec impact à la reprise d'appui
 - pas de départ, d'arrêt
 - pas tournants, montants, descendants, ...

Conclusion: BIP et la suite

- Des thèses soutenues (5, directement sur BIP et la marche)
- Des équipements nouveaux pour le LMS
- Orientation vers la synthèse du mouvement humain
- Accueil d'une équipe de biomécaniciens au LMS
- « Mécanismes et robotique » \Rightarrow « ROBIOSS »
(Robotique, biomécanique, sport et santé)

C'était BIP

C'est Bernard

Merci à tous

Contraintes instantanées

(transition constraints between phases)
(contraintes de transition entre phases)

1- Contraintes de positionnement (échappement et reprise d'appui)

$$\Psi_k(\mathbf{q}(t_k^*)) = 0, \quad (\in \mathcal{R}^{n_k})$$

2- Contraintes de vitesse (échappement et reprise d'appui)

- Sans impulsion, sans choc (/without impact)

$$\mathbf{J}_k(\mathbf{q}(t_k^*)) \dot{\mathbf{q}}(t_k^*) = 0 \quad \mathbf{J}_k := \frac{\partial \Psi_k}{\partial \mathbf{q}}$$

- Avec choc (/with impact) (reprise d'appui)

- Equation de la dynamique du choc

- Solution en $\dot{\mathbf{q}}(t_k^{*+})$

$$\mathbf{M}(\mathbf{q}(t_k^*)) (\dot{\mathbf{q}}(t_k^{*+}) - \dot{\mathbf{q}}(t_k^{*-})) = (\mathbf{J}_k(\mathbf{q}(t_k^*)))^T \mathbf{P}_\lambda$$

$$\dot{\mathbf{q}}(t_k^{*+}) = \mathbf{F}(\dot{\mathbf{q}}(t_k^{*-}))$$

- Equation phénoménologique du choc (choc sans restitution)

$$\mathbf{J}_k(\mathbf{q}(t_k^*)) \dot{\mathbf{q}}(t_k^{*+}) = 0$$

Résolution du problème

➤ Problème non linéaire contraint

➤ Ordre de complexité :

- Nombre de variables : plusieurs centaines
- Nombre de contraintes : plusieurs centaines

➤ Les algorithmes

- Processus itératif avec solution d'initialisation (X_0, Y_0, Z_0) à déterminer.
- Algorithmes de types PQS/SQP
- Codes de calcul disponibles : NAG, MATLAB, SCILAB, ...

➤ Temps de calcul, variable selon :

- la qualité de la solution d'initialisation utilisée
- le niveau de saturation des contraintes recherché.