

# Du contrôle moteur humain à la commande des robots humanoïdes



**Philippe Souères**  
Groupe Gepetto

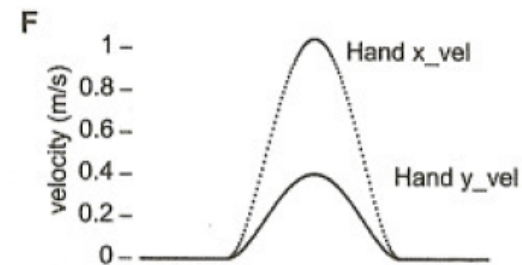
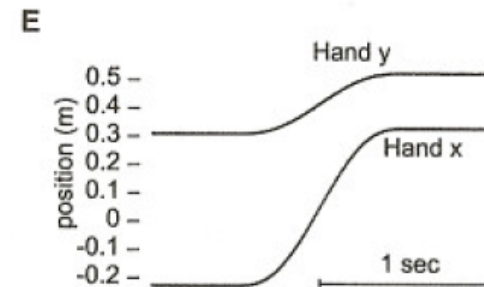
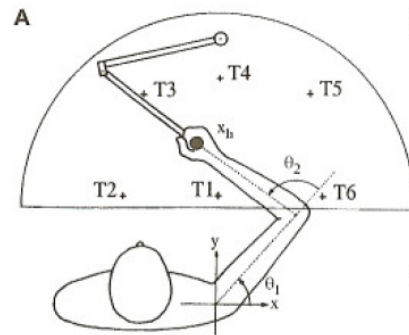
# Un double objectif

- **De l'homme au robot** : Identifier les invariants du mouvement et les principes du contrôle moteur humain pour les appliquer à la commande des robots humanoïdes.
- **Du robot à l'homme** : contribuer à modélisation du fonctionnement du système nerveux central (SNC) en utilisant les formalismes et techniques de la robotique.

# De l'homme au robot...

# Caractéristique cinématique des mouvements d'atteinte humains

- Trajectoires de la main quasi-rectilignes
- Courbes de vitesses lisses et en forme de cloche



[Morasso 81]

# Théorie du contrôle optimal

Pour réaliser un mouvement, le SNC doit choisir un schéma d'activation musculaire parmi une infinité (Bernstein 67):

➡ **Ce choix repose sur la synthèse d'une solution optimale.**

**Difficulté** : La minimisation de différents critères de coût permet de retrouver certaines propriétés du mouvement humain : *jerk* [Flash-Hogan, 85], *torque-change* [Uno et al. 89], *variance* [Harris-Wolpert, 98], *effort et erreur* [Todorov Jordan 2002],...

➡ Le modèle proposé par [Guigon et al. 07] généralise plusieurs modèles antérieurs et fait le lien avec l'activité du SNC

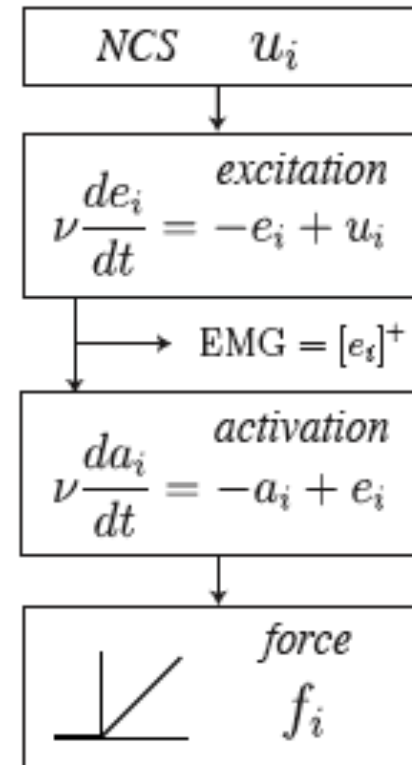
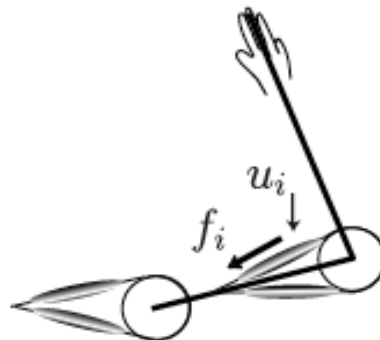
- **Séparation**: Le SNC traite les efforts “statiques” (gravitationnels) et “dynamiques” (inertiels, dépendants de la vitesse) séparément

- **Efficacité maximale**: the SNC vise à atteindre le but avec une erreur nulle tout en minimisant l'énergie des motoneurones.

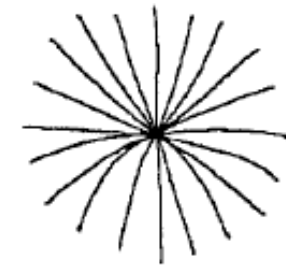
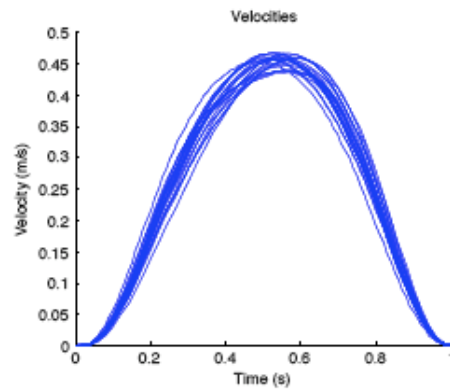
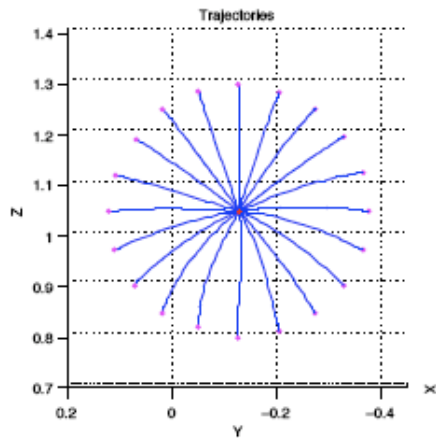
# Application à la commande du robot HRP2

Collaboration avec Emmanuel Guigon [Tran et al 2008]

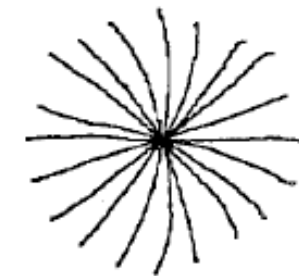
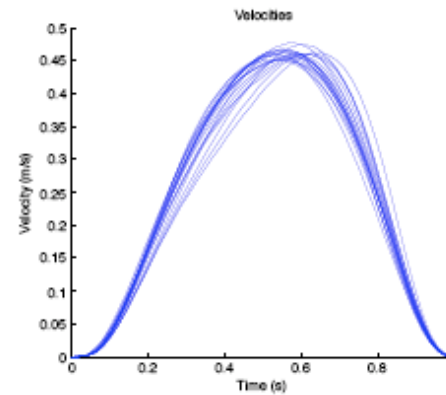
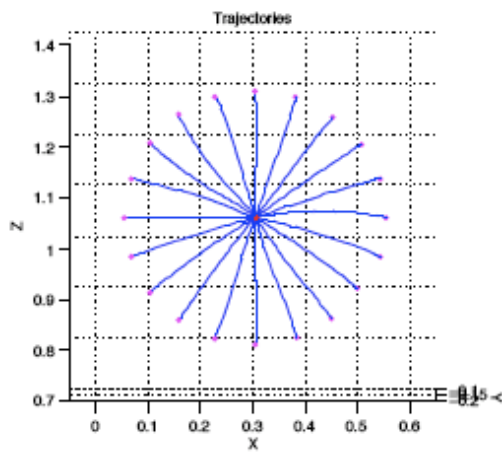
- Modèle dynamique du bras à 6ddl du robot HRP2
- Chaque liaison étant régulée en position, le principe de séparation peut être directement appliqué
- La commande optimale est calculée à partir du modèle dynamique sans efforts gravitationnels
- A chaque ddl, on associe le modèle neuromusculaire d'une une paire de muscles antagonistes (Van der Helm 00).



# Résultats obtenus avec le simulateur dynamique openHRP de HRP2



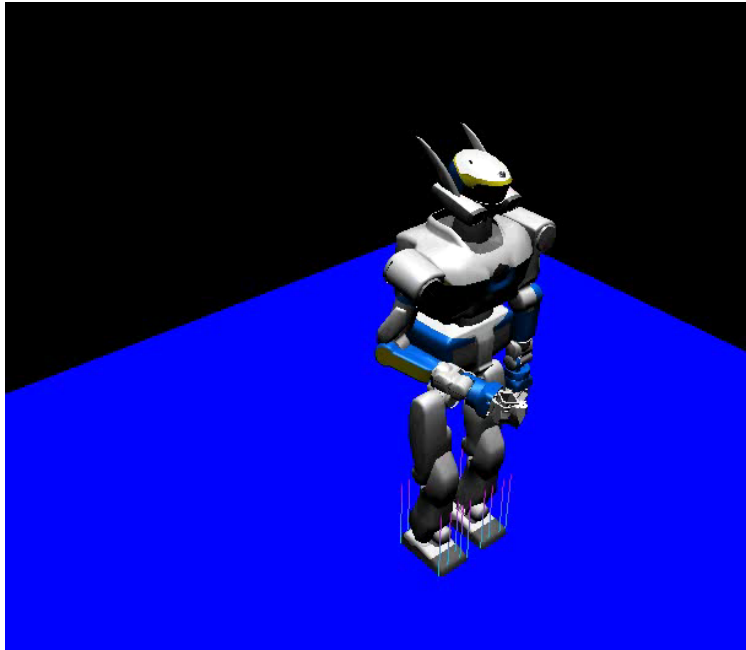
Frontal Plane



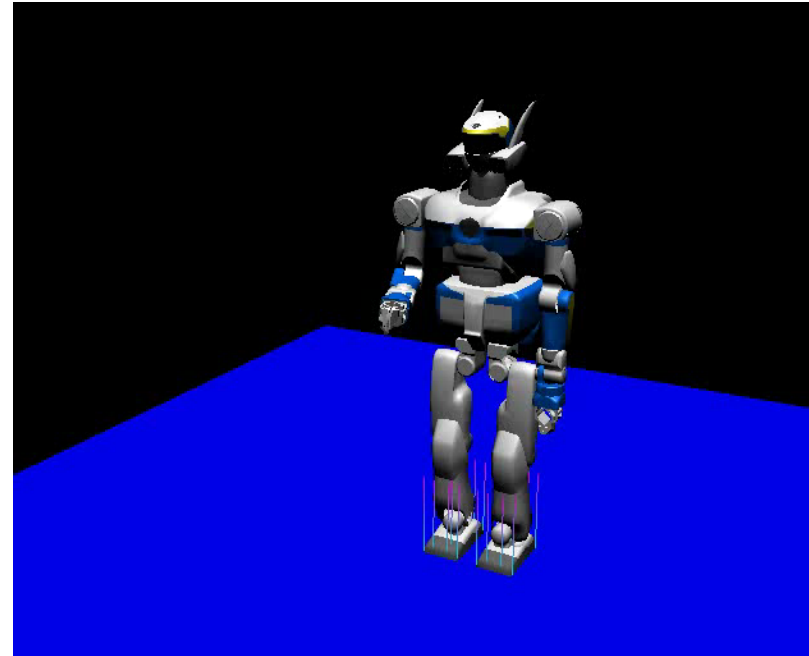
Sagittal Plane

[Flanders 96]

## Exemples de mouvements d'atteinte



Mouvement du bras  
d'amplitude 50 cm.



Extension à la partie haute  
du corps : 8ddl



**Le principal inconvénient de l'approche est le temps de calcul  
(plusieurs minutes pour certains mouvements)**

⇒ Le SNC recalcule-t-il une trajectoire optimale pour chaque mouvement, ou mémorise-t-il l'information?

⇒ Peut-on trouver une base finie fonctions qui permette de reconstruire rapidement les trajectoires optimales?

# Théorie des primitives motrices

⇒ Différents modèles proposés en neurosciences:

**Au niveau cinématique** : Covariation des articulations la cheville, du genou et de la hanche lors de la marche ou autres mouvements [Alexandrov 98], [Lacquaniti 99], [Thomas et al05], [Kaminski07].

**Au niveau musculaire** : EMG révélant l'existence de synergies musculaires pour le contrôle postural [Torres-Oviedo et al, 06]

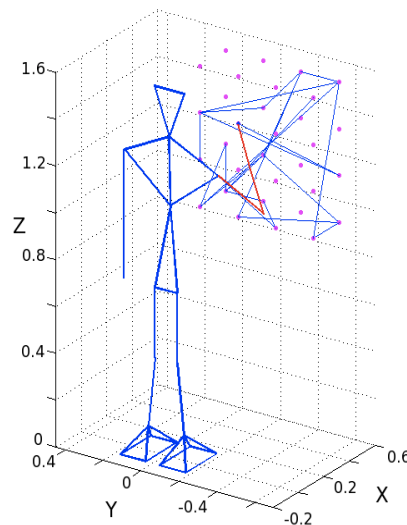
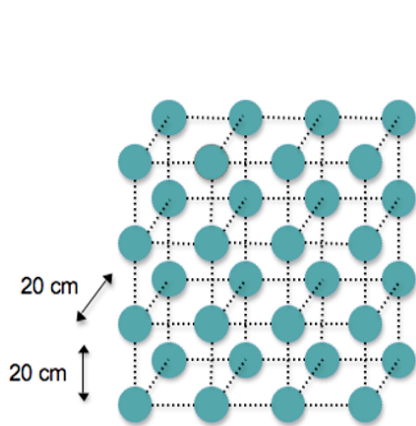
**Au niveau neural** : Stimulations de la moelle épinière produisant des mouvements dirigés de la patte (spinal force fields) [Mussa-Ivaldi and Bizzi 00].

⇒ L'idée d'exprimer la commande à partir d'un petit nombre de primitives motrices est très intéressante pour les roboticiens

# Objectif: extraire des primitives motrices pour reproduire les mouvements humains sur HRP2

## Deux bases de données de mouvements:

- A partir de simulations sur HRP2 basées sur le modèle de [Guigon et al. 07]
- A partir de la capture du mouvement de sujets humains



# Extraction des primitives

- On cherche des primitives en boucle ouverte [Lim 05], [Hauser 07], [Tresh 06].

$$\Phi_k(t) = (\phi_k^1(t), \phi_k^2(t), \dots, \phi_k^6(t))^T$$

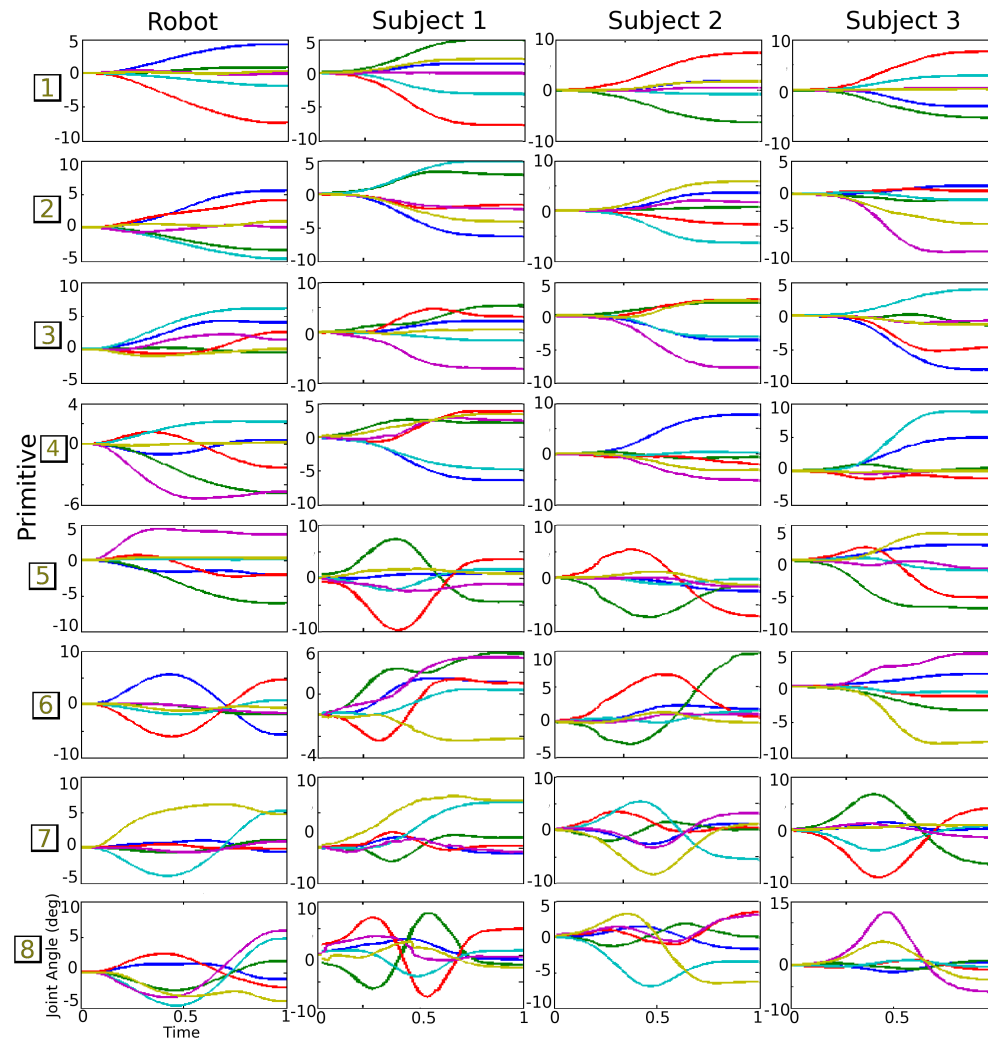
- **Problème** : déterminer  $K$  primitives  $\Phi_k$  telles que, tout mouvement  $U_m$  puisse être approximé par une combinaison linéaire de ces  $K$  primitives :

$$U_m(t) = \sum_{k=1}^K \alpha_k^m \Phi_k(t)$$

- $K$  doit être le plus petit possible mais suffisamment grand pour permettre une reconstruction précise.

# Profil temporel des 8 premières primitives obtenues par Analyse en Composantes Principales

VAF :  
96% pour 8 primitives  
99,5% pour 20 primitives

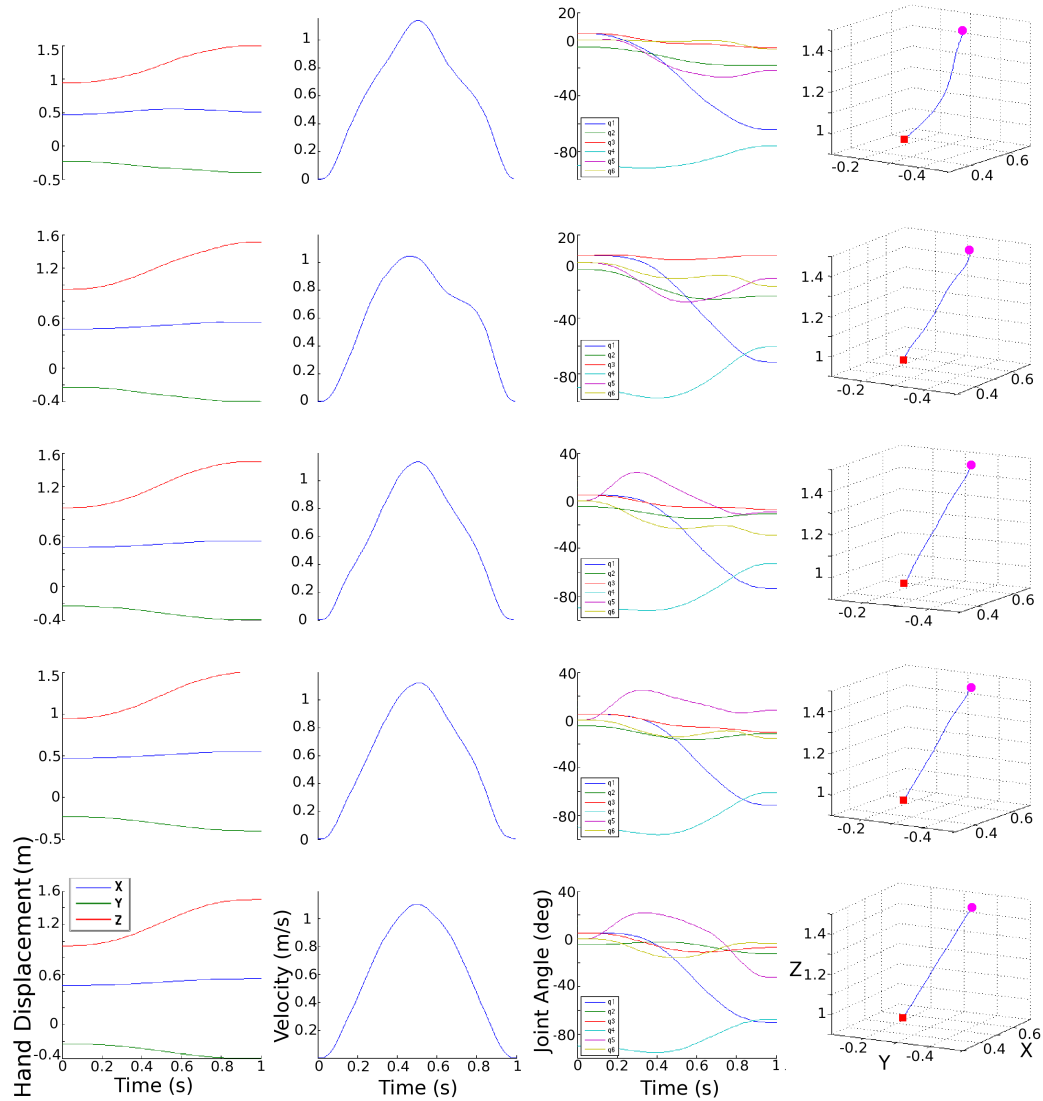


# Généralisation

- **Approche retenue** : détermination des coefficients  $\alpha_k$  pour lesquels la trajectoire de la main satisfait au mieux le critère du minimum-jerk.

Nombre de primitives

6

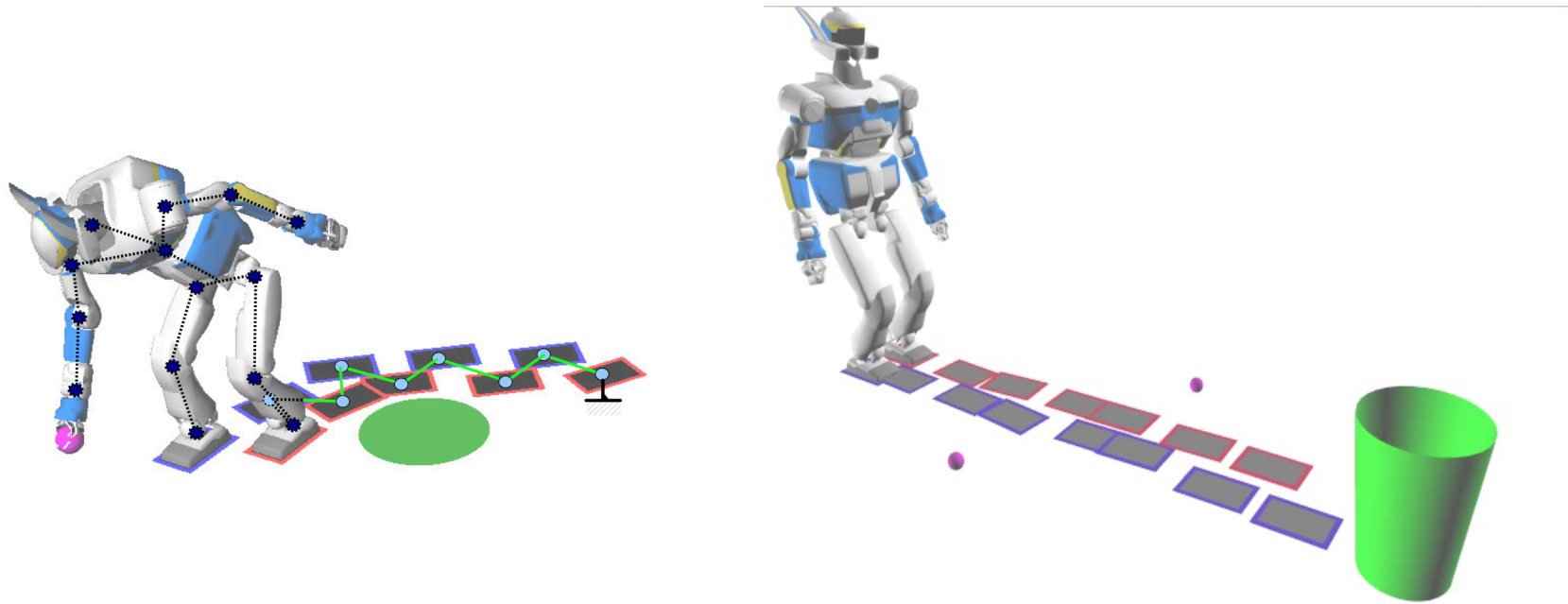


10

12

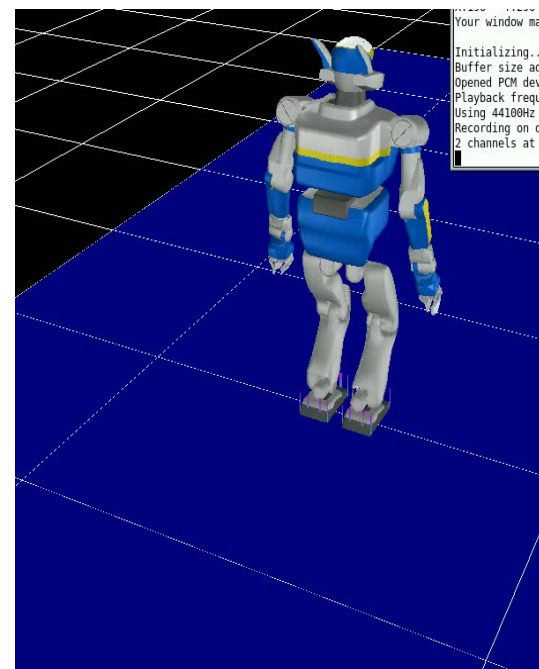
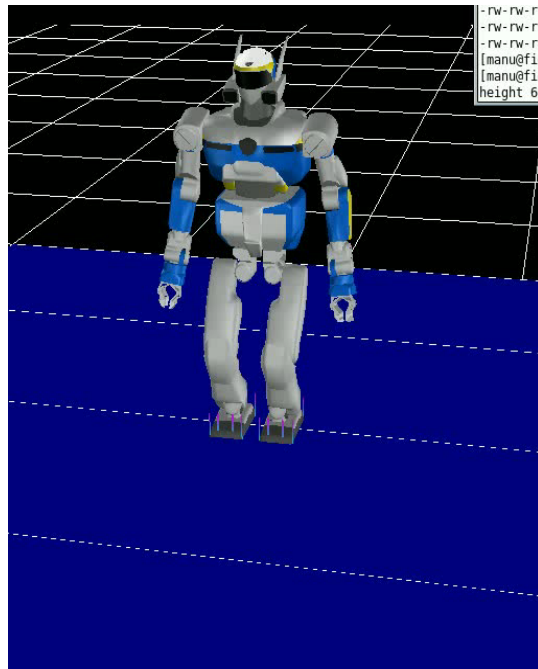
20

# Gepetto développe une algorithmique avancée pour le contrôle des systèmes anthropomorphes



[Kanoun et al. 2009]

# Nécessité de guider la définition de la pile de tâches





# Utilisation d'invariants du mouvement humain pour guider la définition de la pile de tâches

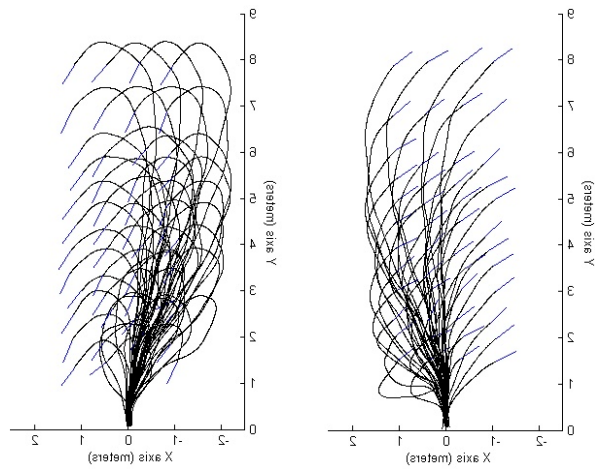
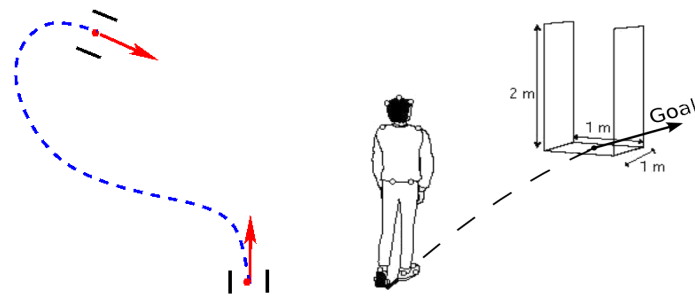
On using human movement invariants  
to generate target-driven  
anthropomorphic locomotion

BioRob 2010  
Tokyo, Japan

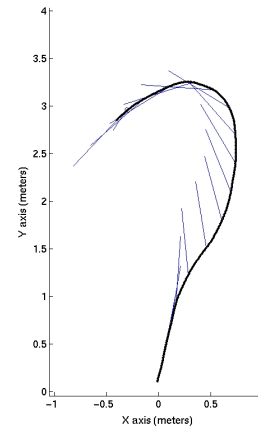
Manish N. Sreenivasa, Philippe Souères  
& Jean-Paul Laumond

[Sreenivasa et al. IEEE Biorob 2010] Best conference paper

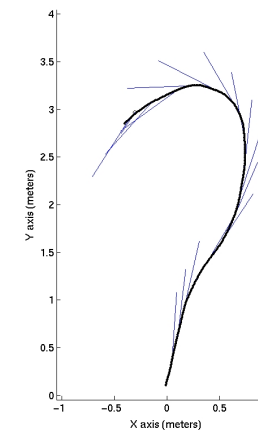
# Modélisation des trajectoires de la locomotion humaine



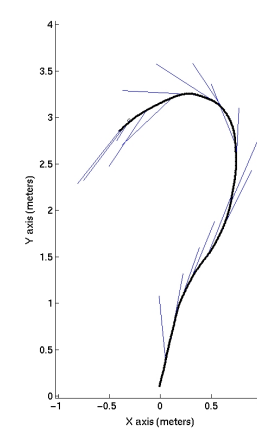
14km, 6 subjects



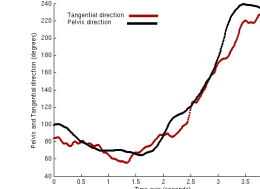
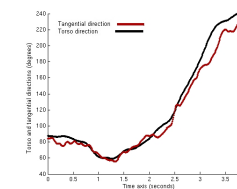
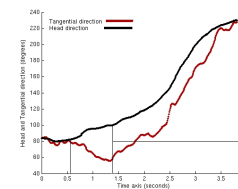
Tête



Torse



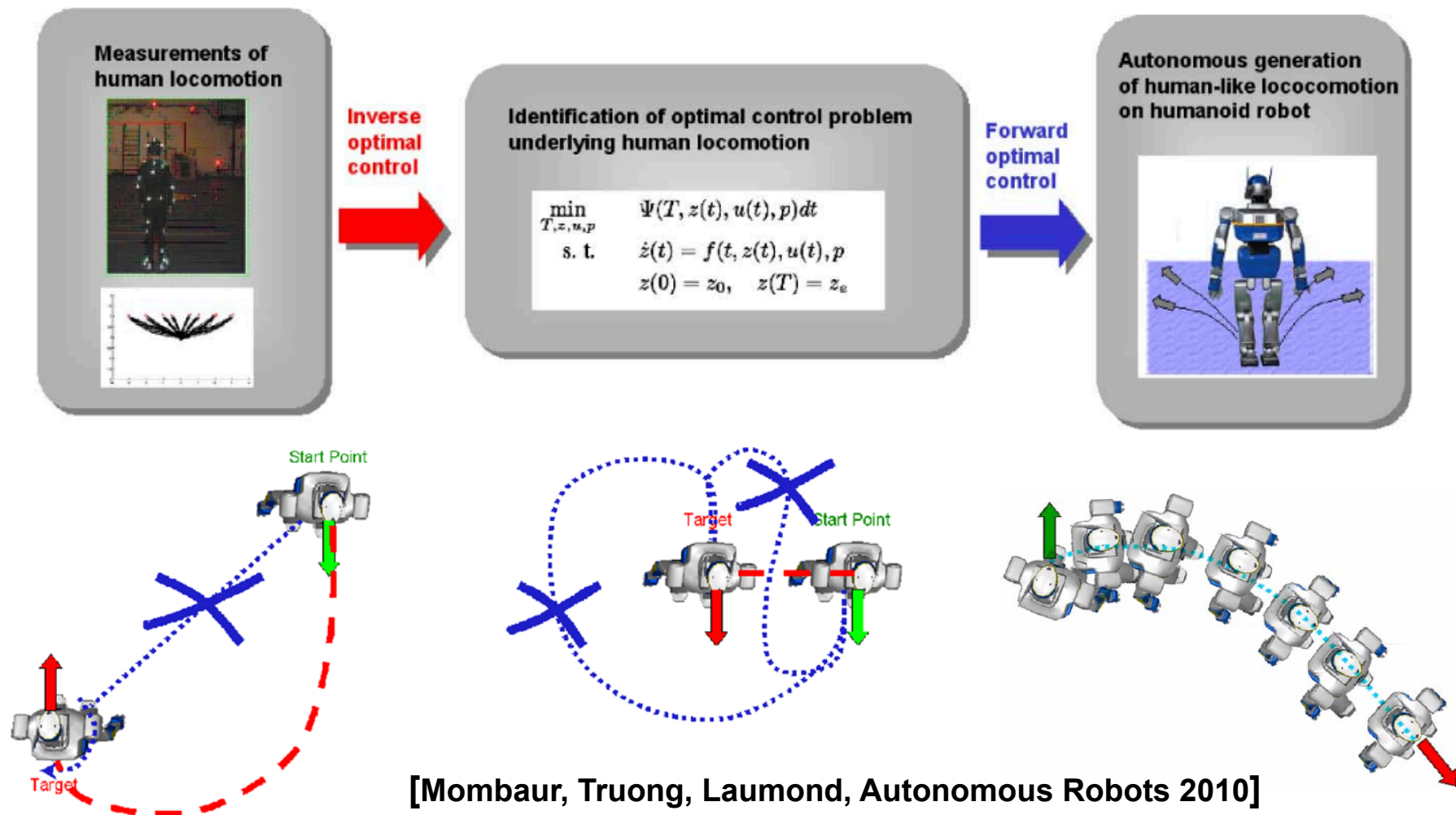
Bassin



Collaboration avec A. Berthoz, LPPA du Collège de France

[Arechalaveta et al. 09] [Pham et al. 2010]

# Le contrôle optimal inverse comme outil de transfert de la locomotion humaines aux robots humanoïdes

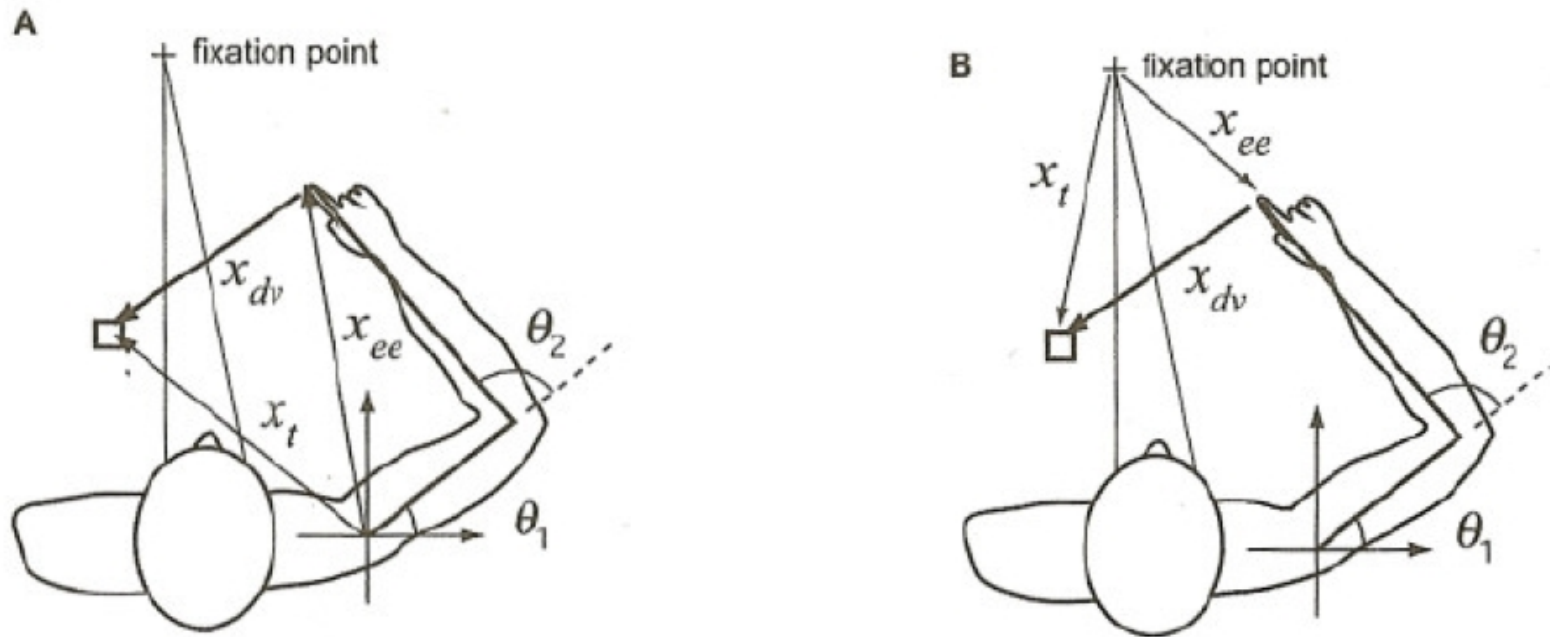


[Mombaur, Truong, Laumond, Autonomous Robots 2010]

# **Du robot à l'homme...**

# Le débat controversé du référentiel du mouvement en neuroscience

Pour contrôler un mouvement d'atteinte vers une cible visuelle, le SNC code-t-il le vecteur de différence main-cible un référentiel visuel ou corps-centré;?

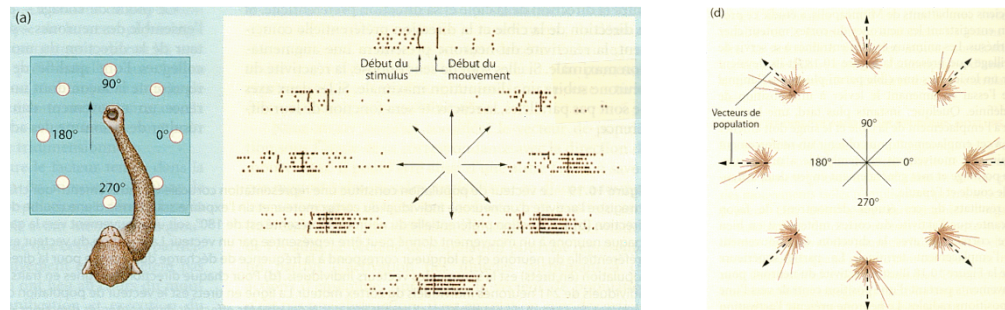


[Shadmehr et Wise 05],

“The computational neurobiology of reaching and pointing”.

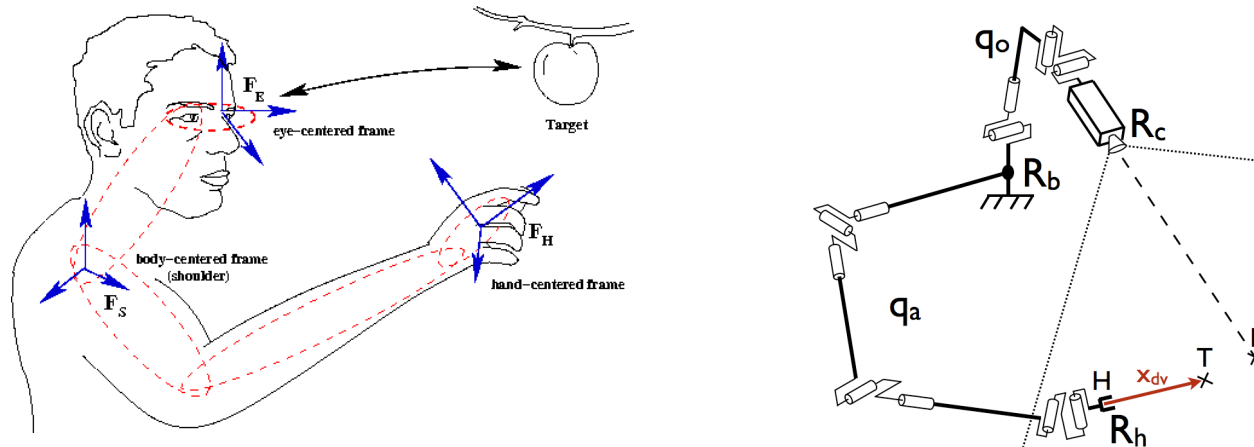
# Le débat controversé du référentiel du mouvement en neuroscience

- Un premier courant de pensée basé en faveur d'un codage corps-centré du vecteur de différence [Georgopoulos 82], [Crammond 89], [Tillery et al. 96],...



- Des résultats récents en électrophysiologie [Trotter 00], [Buneo 02], et en psychophysique [Henriques et al. 02] montrent que le vecteur de différence est codé en coordonnées visuelles.
- Dans de nombreux modèles, le corps reste la référence du mouvement, la chaîne oeil-cou étant rarement considérée [Pouget et al.02] [Blohm et al. 09], [Shadmehr and Wise 05]
- **Comment expliquer la modulation “gaze-related” de l’activité des neurones de PMd lors de l’exécution de mouvements d’atteinte d’une cible visuelle? [Jouffrais et al. 00]**

# Interprétation de la tâche d'atteinte dans le formalisme de l'asservissement visuel



Collaboration avec Y. Trotter et C. Jouffrais, CerCo [Souères et al. 07, Halgand et al.10]

- Contrôle indépendant de l'œil vers le point de fixation (**eye-in-hand**)

$$e_1 = s_F - s_F^* \quad \dot{q}_O = J_{e_1}^+ \dot{e}_1$$

- Contrôle de la main vers la cible (**eye-to-hand**):

$$e_2 = s_H - s_T$$

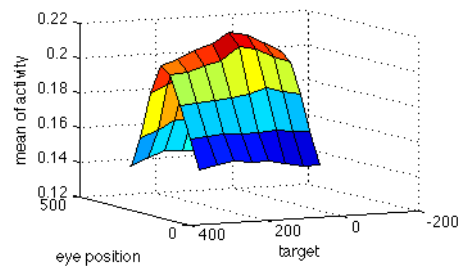
$$\dot{q}_a = J_{e_2}^+ \left( \dot{e}_2 - \frac{\partial e_2}{\partial t} \right) \quad \text{with} \quad \begin{cases} J_{e_2} = -L_{S_H} {}^c V_b^b J(q_a) \\ \frac{\partial e_2}{\partial t} = \frac{\partial e_2}{\partial t} \dot{q}_O = (L_{S_H} - L_{S_T}) {}^c V_b^b J(q_O) [L_{S_F} {}^c V_b^b J(q_O)]^+ \dot{e}_1 \end{cases}$$

**Si le vecteur main-cible est exprimé dans le référentiel visuel les liaisons de l'œil et du cou sont des paramètres de la commande**

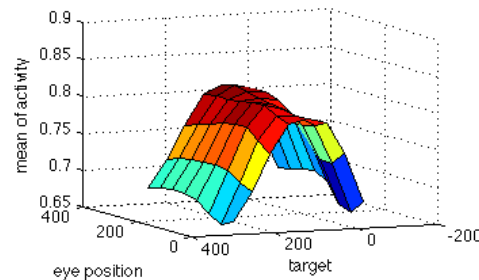
# Implantation du contrôleur d'atteinte référencé vision sur un réseau de neurones artificiels

- Analyse du niveau moyen d'activité de 12 neurones de la couche cachée durant l'exécution de 72 mouvements (9 cibles × 8 points de fixation)

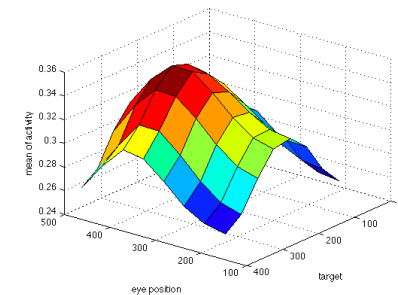
Trois modèles d'activité similaires à ceux observés dans PMd:



**Gaze-related modulation**



**Modulated by target position**



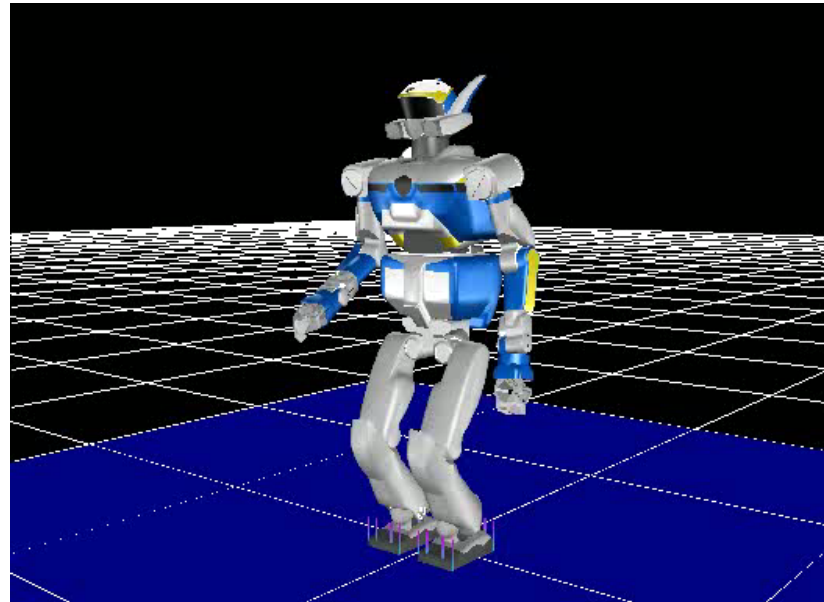
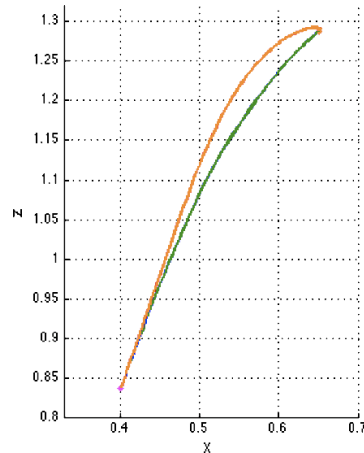
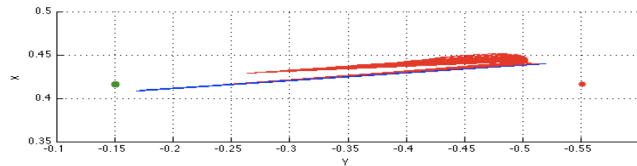
**Combined effects**

- La direction préférée de certains neurones est modulée par la direction du regard.
- Des résultats en électrophysiologie réalisés au CerCo chez le singe montrent l'existence d'un effet de modulation des neurones de V1 lié à la position des yeux et à la position de la tête [Trotter 99, Halgand 2011]



# Meilleure robustesse aux biais proprioceptifs et aux délais sensoriels du contrôle oculocentré

- Comparaison de schémas de commande oculocentrés et corps-centrés
- Analyse systématique des transformation nécessaires dans les deux cas  
➡ arguments computationnels



**Collaboration avec Benoît Girard [Tuan et al. IEEE Robio 09]**

**Best conference paper finalist**