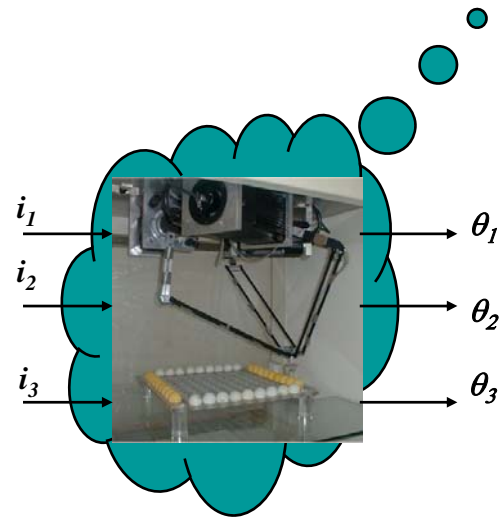
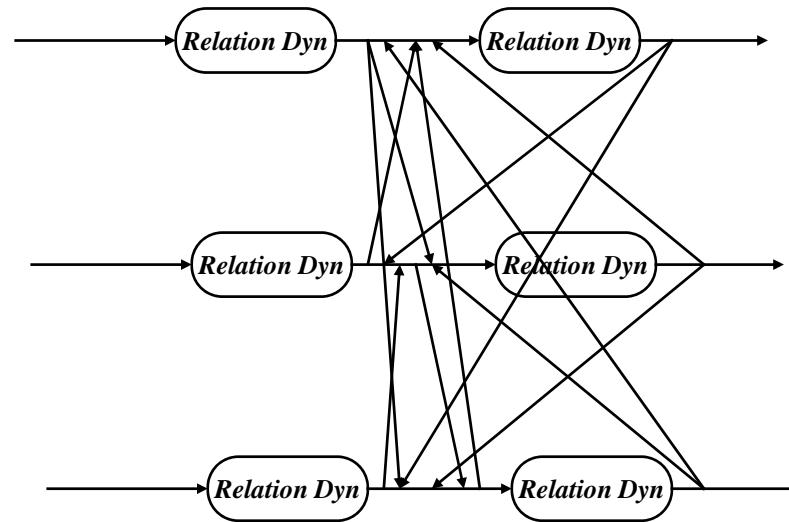


## **Très important :**

Les sources d'écart entre le modèle construit et le modèle théorique proviennent principalement de la maîtrise de la connaissance des éléments suivants:

- ✓ Le rendement de la transmission (ce dernier peut également varier en fonction de la vitesse et de la lubrification et aussi de la température).
- ✓ Les frottements dans la transmission.
- ✓ La charge à déplacer (qui peut varier en fonction des besoins du client).
- ✓ L'amplificateur (gain et bande passante).
- ✓ Des forces externes provenant de sources diverses.

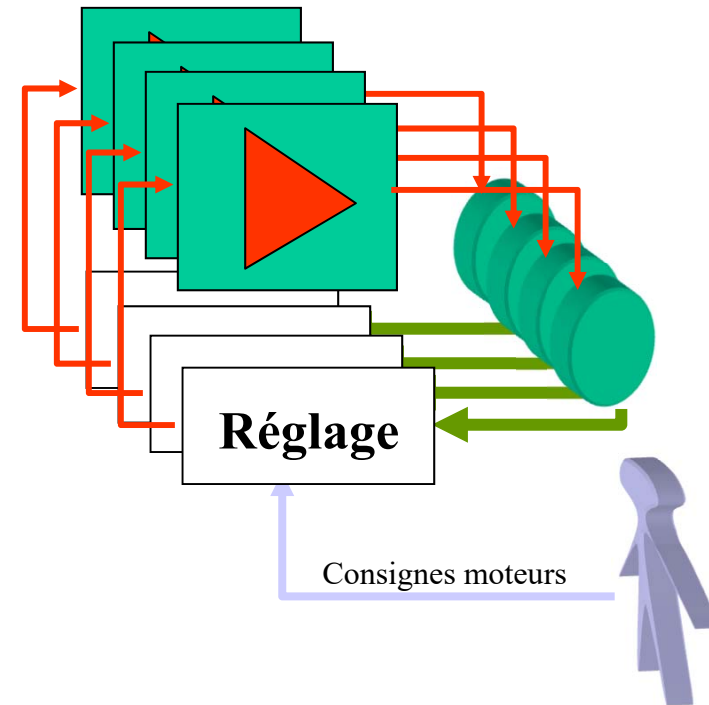
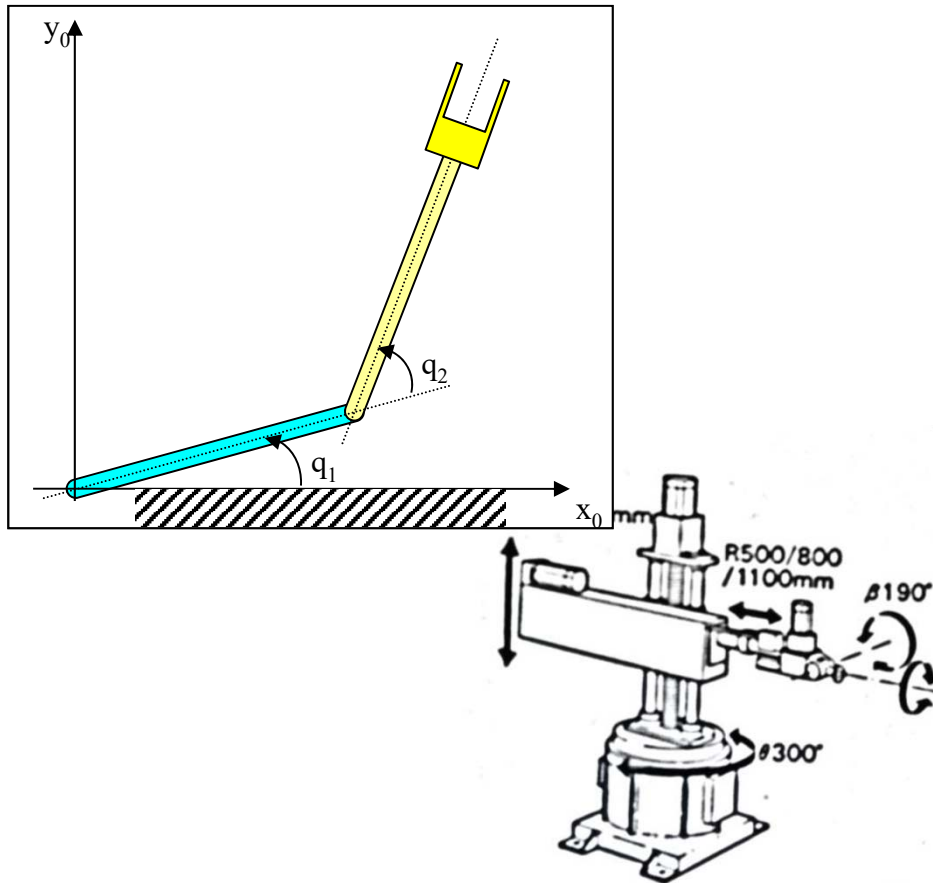
# Les couplages



# Première partie

## Objectif Asservissement

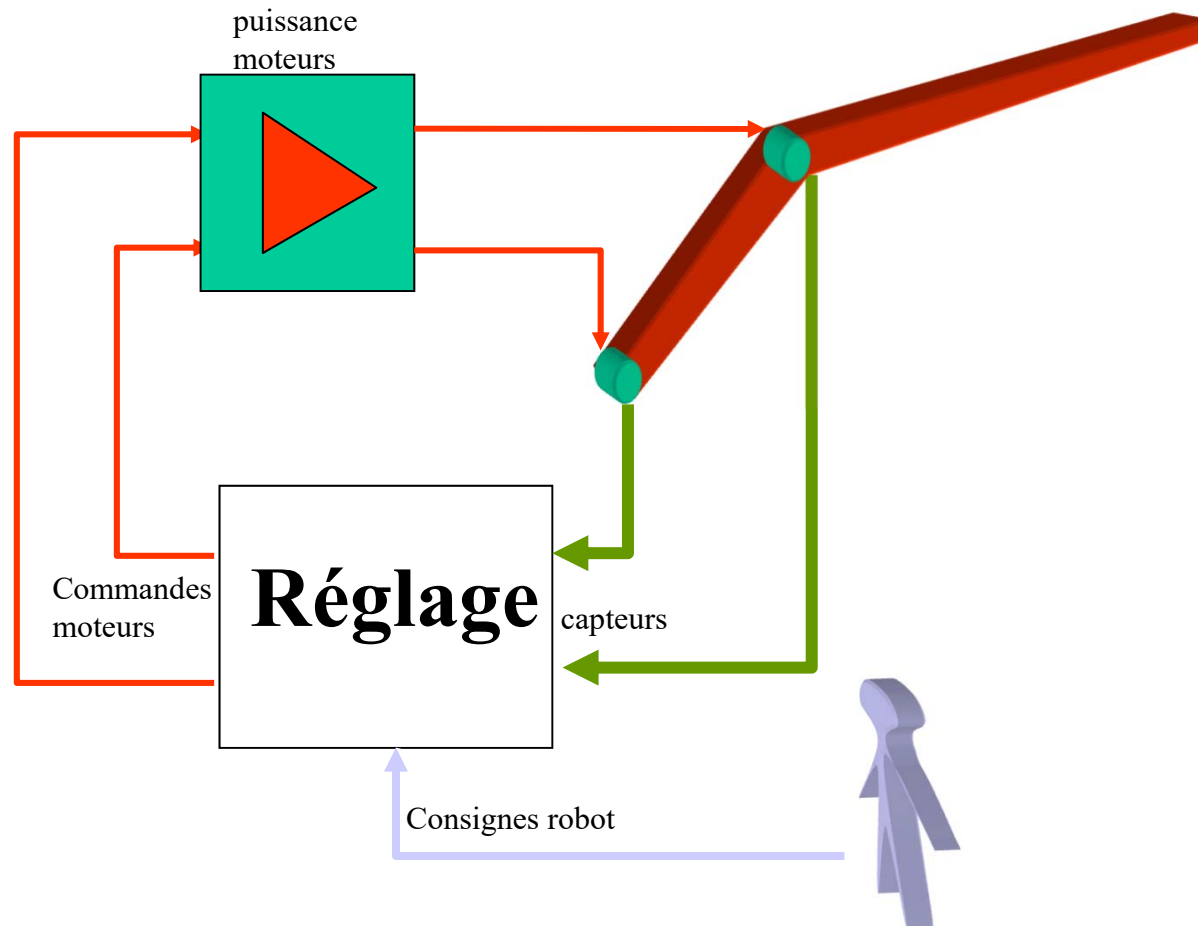
### Rappel - Possibilité 1 -



- **Contrôle de plusieurs moteurs**
- **Commande décentralisée –**
- **Commande dans l'espace articulaire**

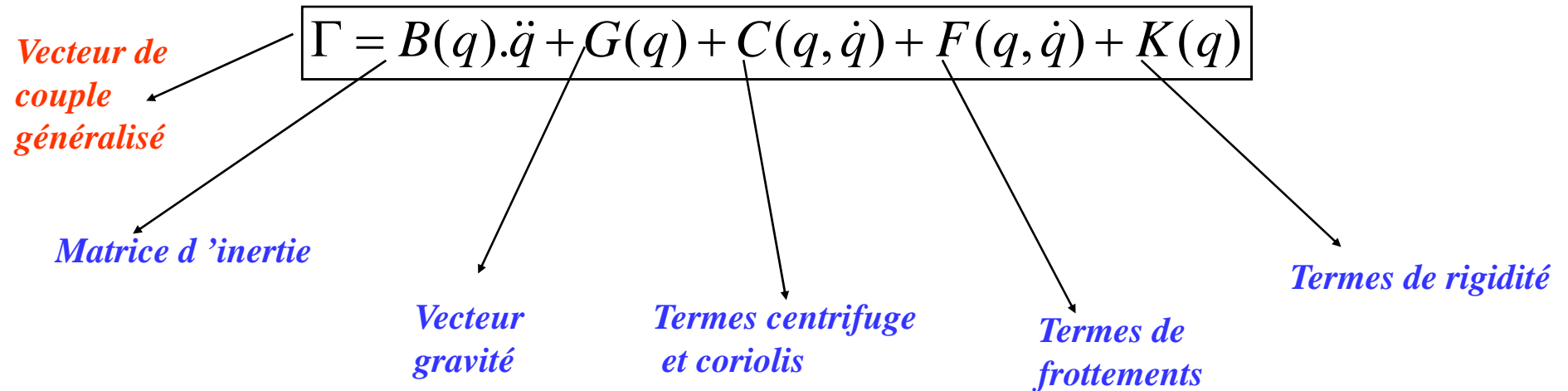
# Objectif Asservissement

What Else – Faisons Mieux -



**Contrôle d'un robot - prise en compte des couplages et/ou des non linéarités**

## Modèle dynamique de robot



*Que nous mettons sous la forme :*

$$\Gamma = B(q) \cdot \ddot{q} + H(q, \dot{q})$$

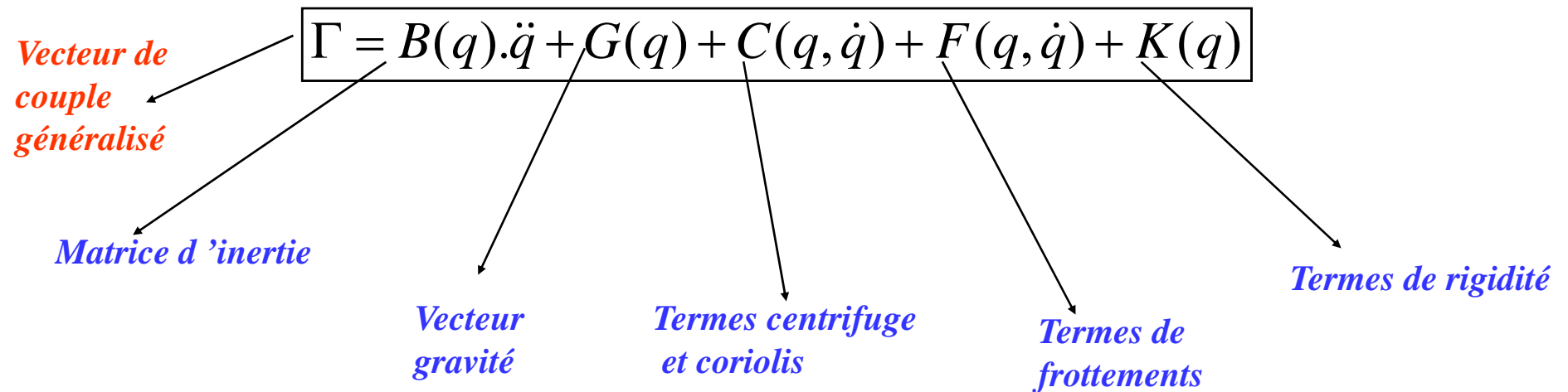
$$\ddot{q} = (B(q))^{-1} (\Gamma - H(q, \dot{q}))$$

Modèle dynamique du robot

$$\dot{x} = f(x) + g(x) \cdot u$$

Forme équations d'état

## Modèle dynamique de robot



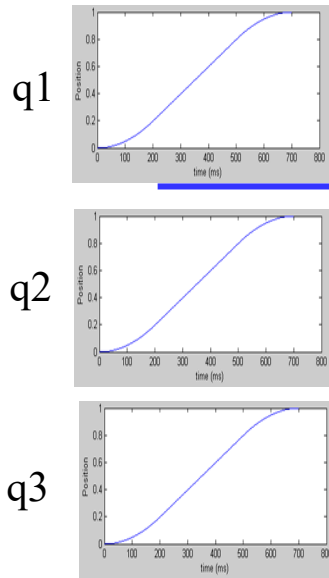
*Que nous mettons  
sous la forme :*

$$\Gamma = B(q) \cdot \ddot{q} + H(q, \dot{q})$$

# commande a priori

*Principe*

Boucle ouverte




Trajectoires désirées

$$\Gamma = B(q).\ddot{q} + H(q, \dot{q})$$

*Modèle Inverse  
du robot (??)*

*Robot*

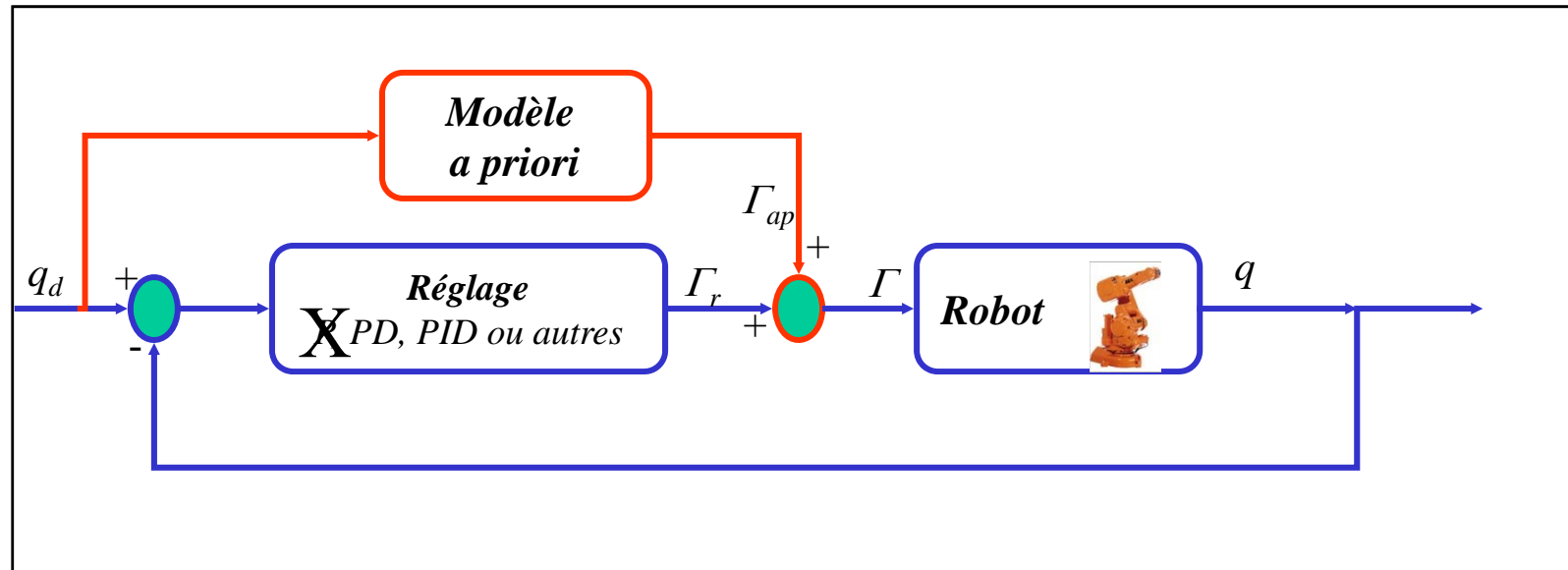


$\Gamma$

$q$

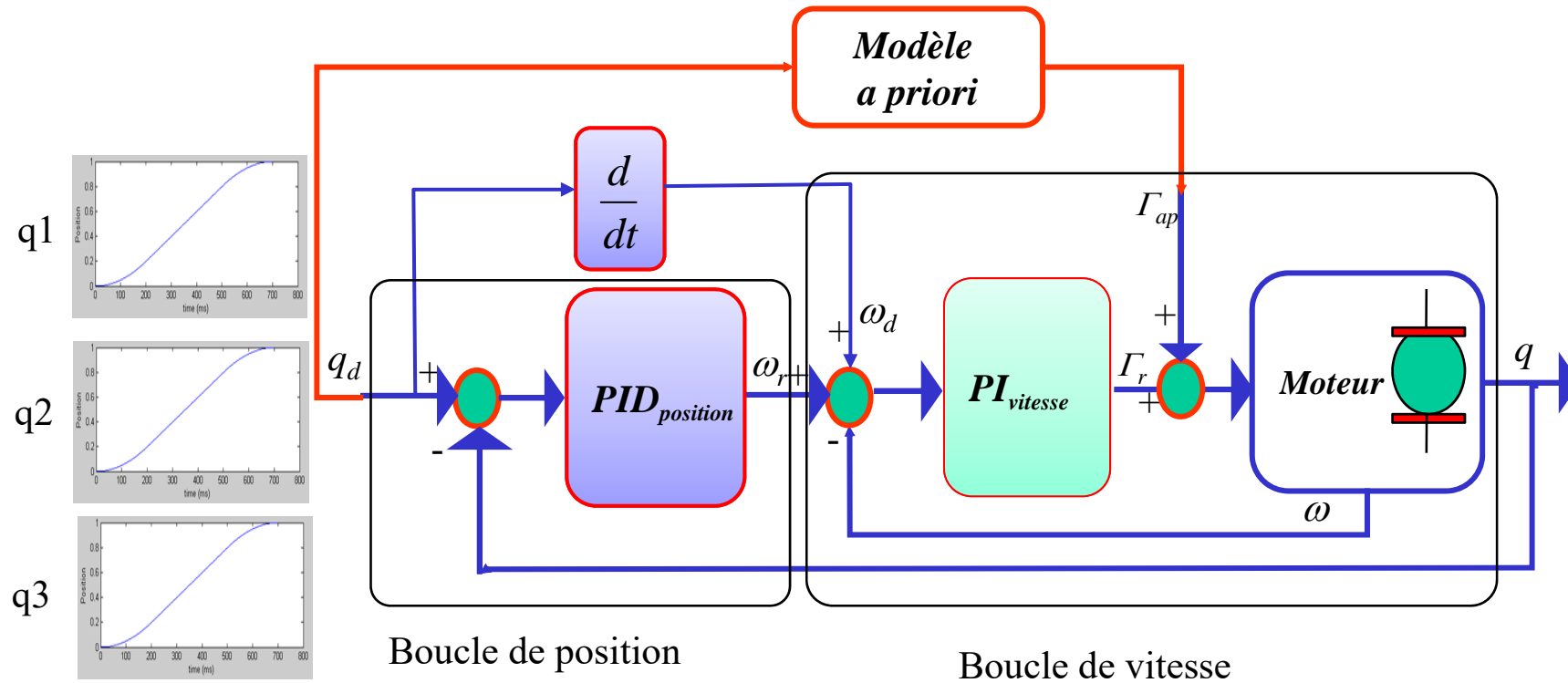
# commande a priori

## Régulateur décentralisé + A priori

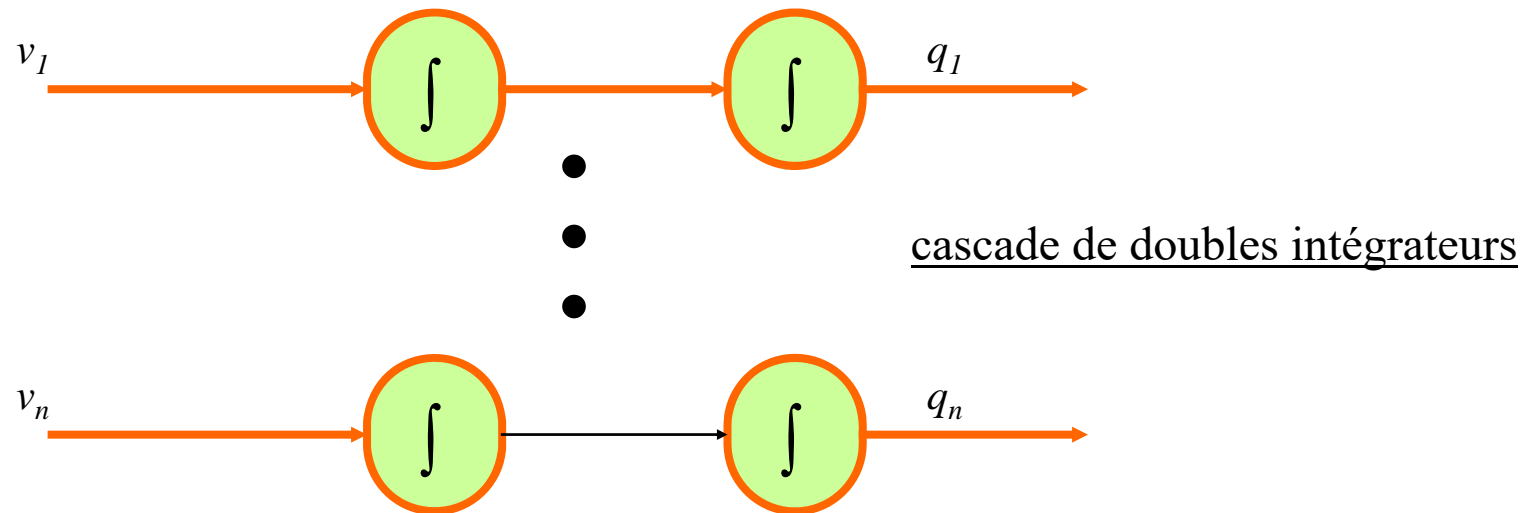
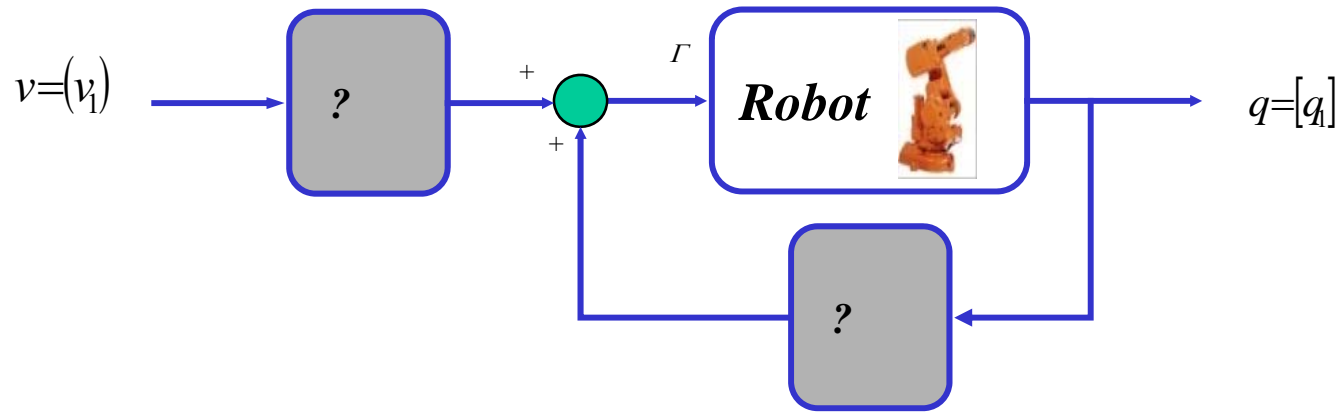




# Commande cascadee et a priori de couple

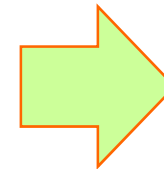
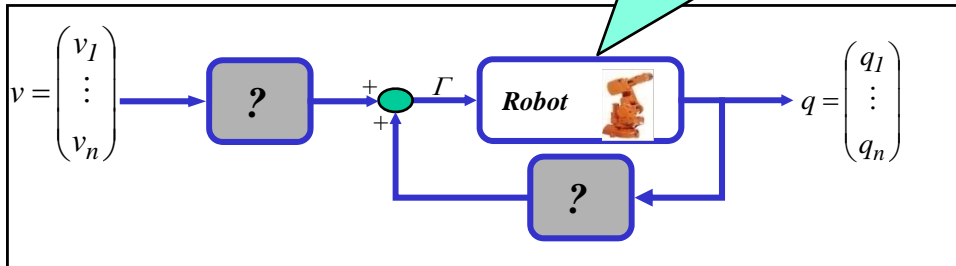


# Commande par la compensation des non linéarités – (Non Linear Linearizing Control)

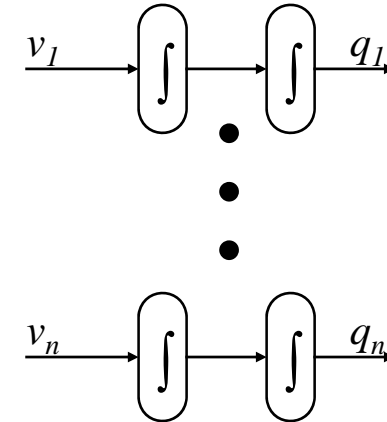


Commande par la compensation des non linéarités  
 (Non Linear Linearizing Control)

$$\Gamma = B(q).\ddot{q} + H(q, \dot{q})$$



Objectifs



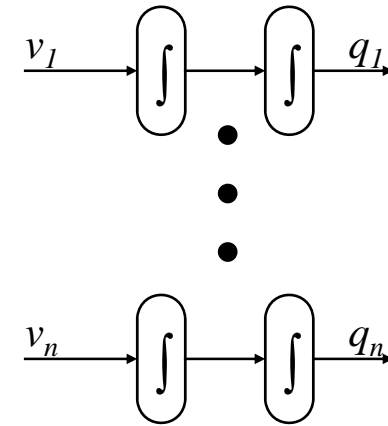
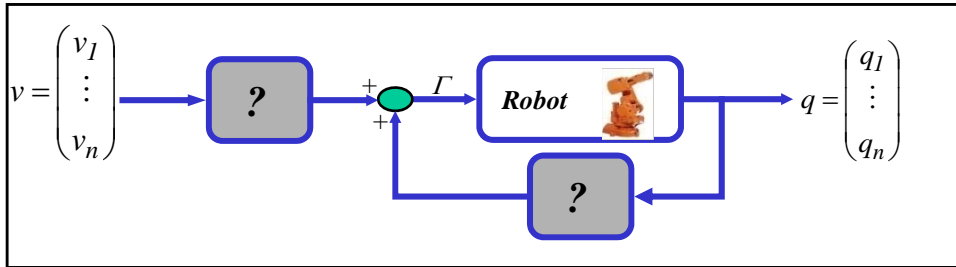
cascade de doubles intégrateurs

$$\ddot{q} = v$$

Observons la loi de contrôle

$$\Gamma = B(q).v + H(q, \dot{q})$$

**commande par le couple calculé:**  
 (computed torque control)

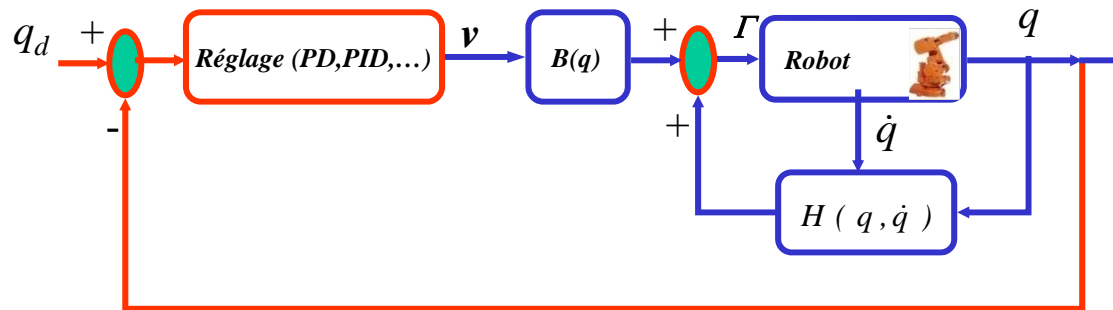


cascade de doubles intégrateurs

Il faut maintenant stabiliser les doubles intégrateurs par un bouclage :

- PD,
- PID,
- ou bouclage avancé (adaptatif, mode glissant, ...)

$$\Gamma = B(q).v + H(q, \dot{q})$$



# commande par le couple calculé:

(computed torque control)

**Principe**

A partir du modèle non linéaire

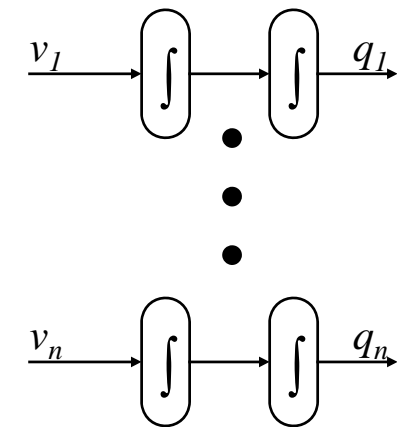
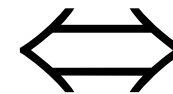
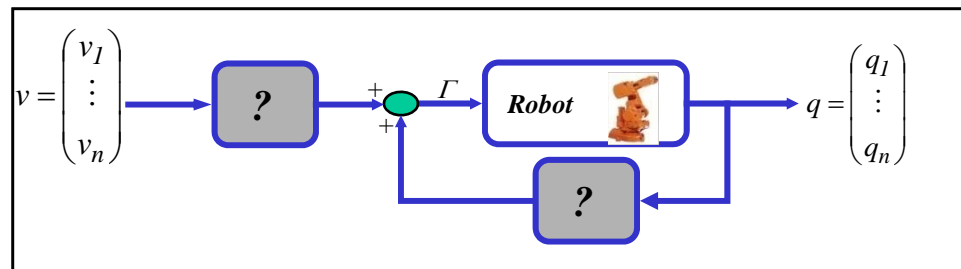
on boucle pour obtenir le modèle linéaire suivant

$$\ddot{q} = (B(q))^{-1} (\Gamma - H(q, \dot{q})) \Rightarrow \ddot{q} = v$$

**Comment?**

$$\underline{\Gamma = B(q).v + H(q, \dot{q})}$$

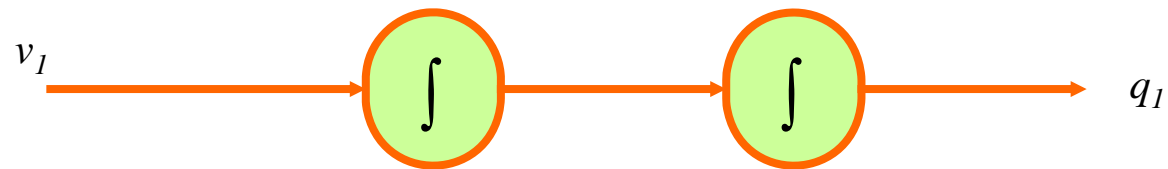
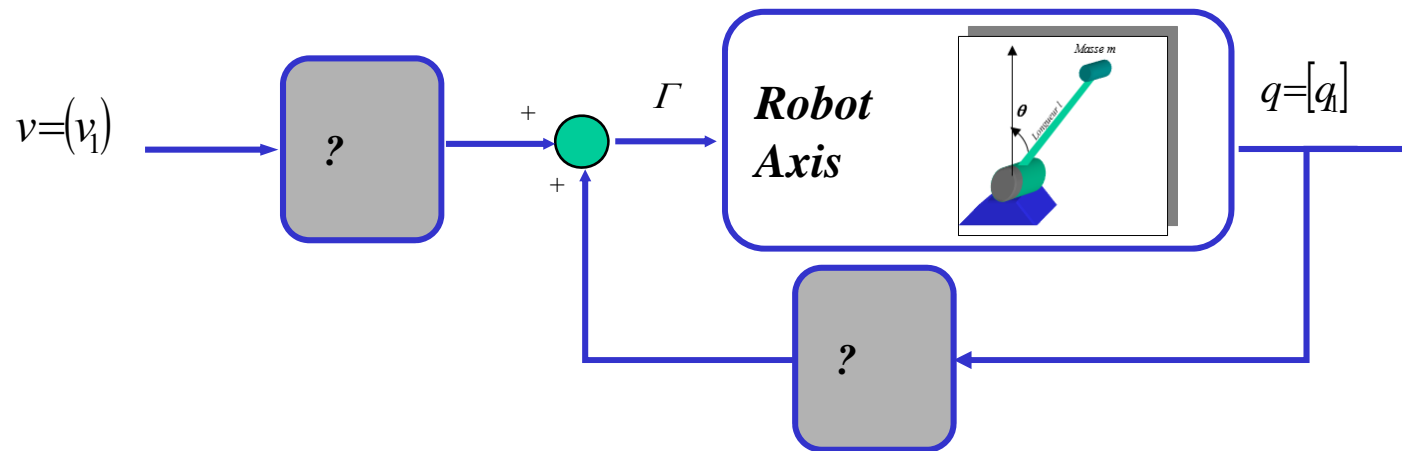
$$\Rightarrow \ddot{q} = (B(q))^{-1} (B(q).v + H(q, \dot{q}) - H(q, \dot{q})) = v$$



cascade de doubles intégrateurs

# Commande par la compensation des non linéarités – (Non Linear Linearizing Control)

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= -\frac{mgl}{J} \sin(x_1) - \frac{\alpha_{vis}^*}{J} x_2 + \frac{k_c}{J} \Gamma \end{aligned}$$

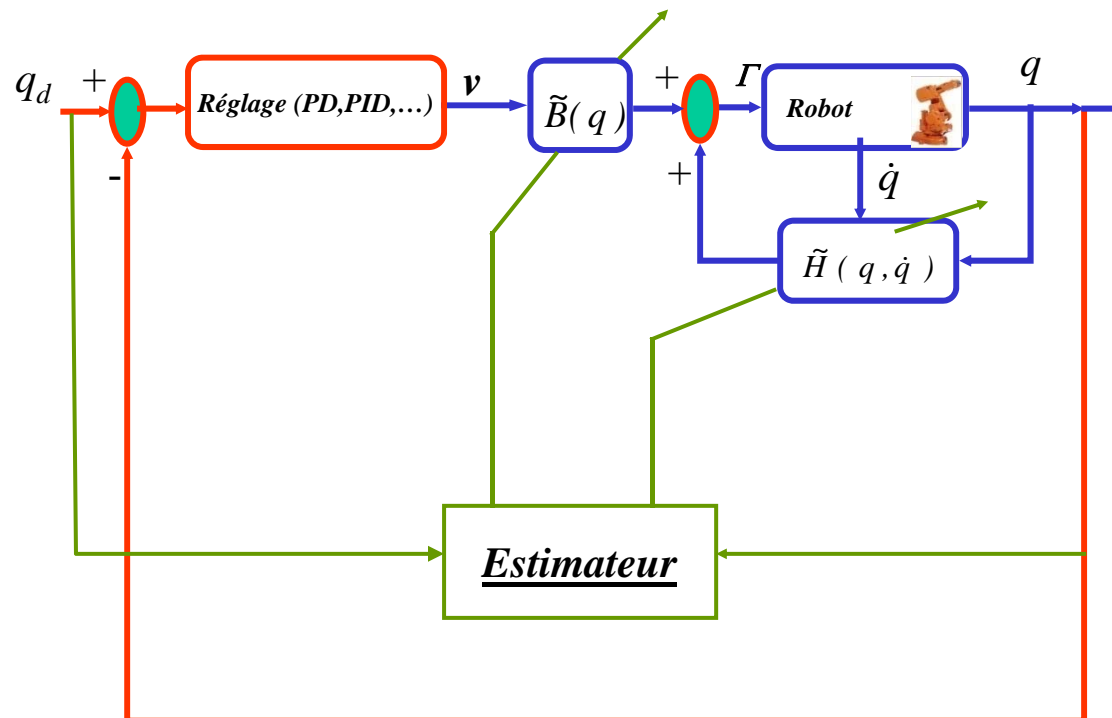


# commande adaptative par le couple calculé:

(Adaptive computed torque control)

*Observons la loi  
de contrôle*

$$\Gamma = \tilde{B}(q).v + \tilde{H}(q, \dot{q}) \quad \tilde{B}(q) \text{ et } \tilde{H}(q, \dot{q}) \text{ sont les termes estimés du modèle}$$

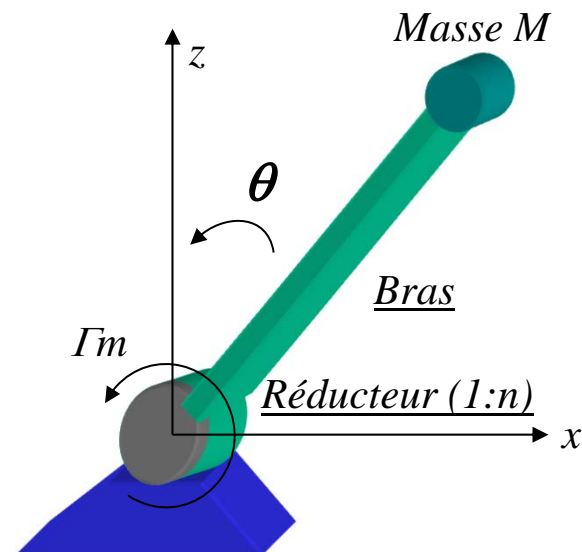


**Après le système le plus simple du monde, voici le système le plus fréquent du monde.**

J'espère que vous avez compris que **l'axe précédent n'est pas utopique** car il s'agissait d'un modèle d'axe à actionnement direct (ie. sans réducteur).

Cependant le modèle de l'axe rotatif le plus fréquent correspond à un axe rotatif avec un réducteur, un bras de robot et une charge au bout. Si nous ne considérons pas les couplages, tous les bras de robots peuvent être représentés par le modèle suivant.

- Un moteur d'inertie  $J_m$
- Un réducteur de rapport  $n$
- Un bras d'inertie  $J_b$  (inclus l'inertie du réducteur et de l'accouplement), de masse  $M_b$  et de longueur  $l$
- Une charge  $M$  à l'extrémité du bras.
- Un coefficient de viscosité ramené à la charge  $k_{vis}$ .





Modèle dynamique écrit par rapport à la position de la charge:

$$\sum M = J_T \ddot{\theta} = n\Gamma_m - M_b g \frac{l}{2} \sin(\theta) - Mgl \sin(\theta) - k_{vis} \dot{\theta}$$

- $n\Gamma_m$  est le couple moteur ramené à la charge (c'est le couple d'actionnement de la charge que nous appellerons  $\Gamma_{act}$ )
- $J_T$  est le moment d'inertie total ramené à la charge. Il est exprimé comme suit:

$$J_T = J_b + n^2 J_m + Ml^2$$

Le modèle dynamique a priori est la valeur du couple moteur donné pour les trajectoires désirées. Commençons par inverser les équations en déduisons l'expressions du couple d'actionnement de la charge.

$$\Gamma_{act} = n\Gamma_m = J_T \ddot{\theta} + M_b g \frac{l}{2} \sin(\theta) + Mgl \sin(\theta) + k_{vis} \dot{\theta}$$

$$\Gamma_{act\_ap} = n\Gamma_{m\_ap} = J_T \ddot{\theta}_d + M_b g \frac{l}{2} \sin(\theta_d) + Mgl \sin(\theta_d) + k_{vis} \dot{\theta}_d$$

$$\Gamma_{m\_ap} = \frac{1}{n} \left\{ J_T \ddot{\theta}_d + M_b g \frac{l}{2} \sin(\theta_d) + Mgl \sin(\theta_d) + k_{vis} \dot{\theta}_d \right\}$$

$$\Gamma_{act\_ap} = n\Gamma_{m\_ap} = J_T\ddot{\theta}_d + M_b g \frac{l}{2} \sin(\theta_d) + Mgl \sin(\theta_d) + k_{vis}\dot{\theta}_d$$

Est le couple dynamique a priori ramené à la charge. Peu être utile pour le dimensionnement des besoins liés à la charge avant d'avoir choisi le réducteur

$$\Gamma_{m\_ap} = \frac{1}{n} \left\{ J_T\ddot{\theta}_d + M_b g \frac{l}{2} \sin(\theta_d) + Mgl \sin(\theta_d) + k_{vis}\dot{\theta}_d \right\}$$

Est le couple dynamique a priori ramené au moteur servira à évaluer les besoins du moteur et à la commande en a priori. Attention à prendre également en compte le rendement de la réduction si vous le connaissez !

*Autre exemple traité en annexe jointe au cours.*

# Position Control by Examples

---

## 1 Device description

Consider the following device (Figure 1). It is a cable driven disc steered by a Brushless Maxon<sup>1</sup> DC motor. It is equipped with two incremental encoders for position measurement. The first one is on the motor shaft and the second one is on the output shaft.

The device parameters are considered as follows:

- $M_D$  and  $J_D$  are respectively the Mass and the Inertia of the disc relative to its rotation center.
- $r_g$  is the distance of the center of mass of the disc to its rotation center.
- $I_m$  is the inertia of the motor.
- The gear ratio of the cable based transmission is 15.

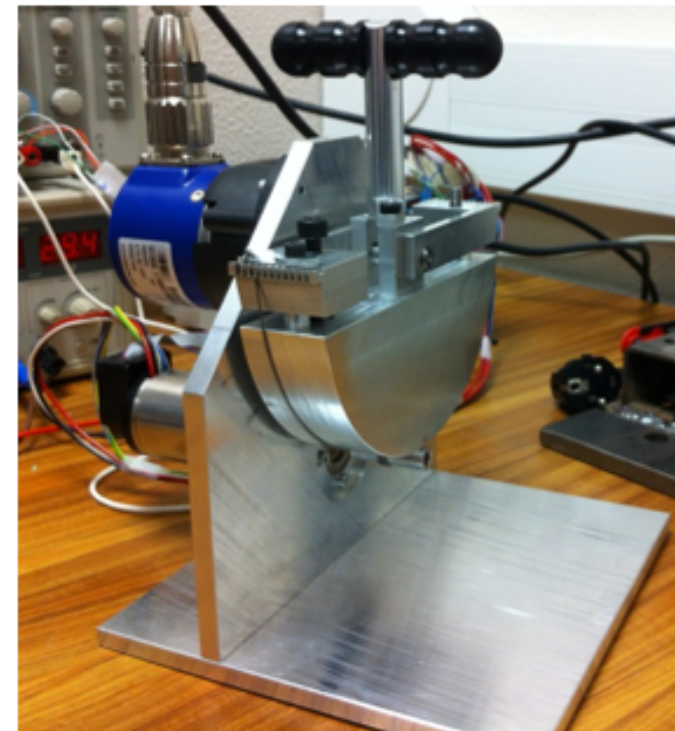
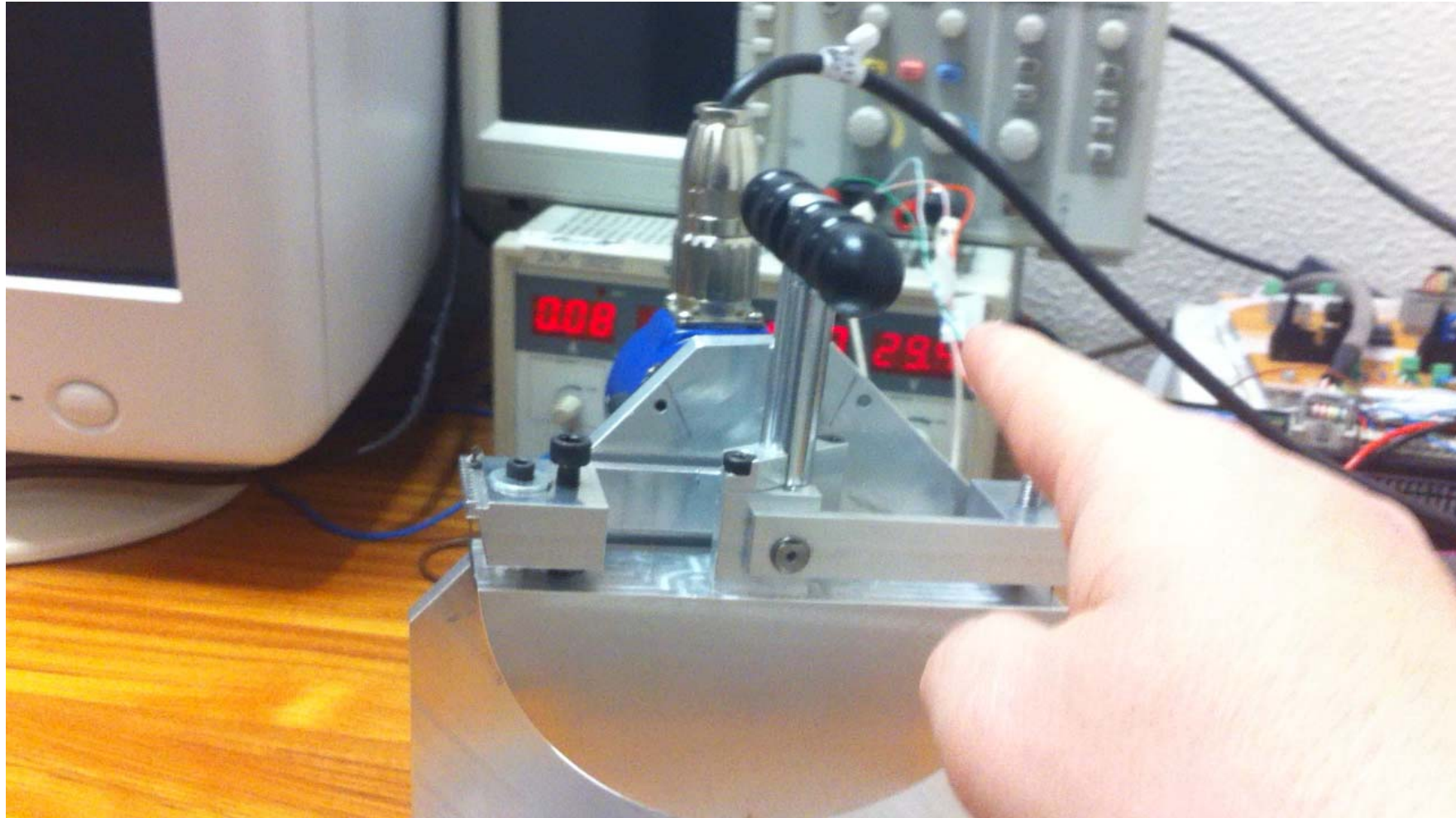


Figure 1-Haptic Device used for position control

# Haptic Paddle with compensation of Dry and Viscous friction and Gravity



## deuxième partie

### génération de trajectoires

