

# Commande de robots



Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne

Laboratoire des Systèmes Robotiques

Dr M. Bouri,

# Le Robot et sa commande



## Robot:

- Structure mécanique,
- motorisation,
- instrumentation.



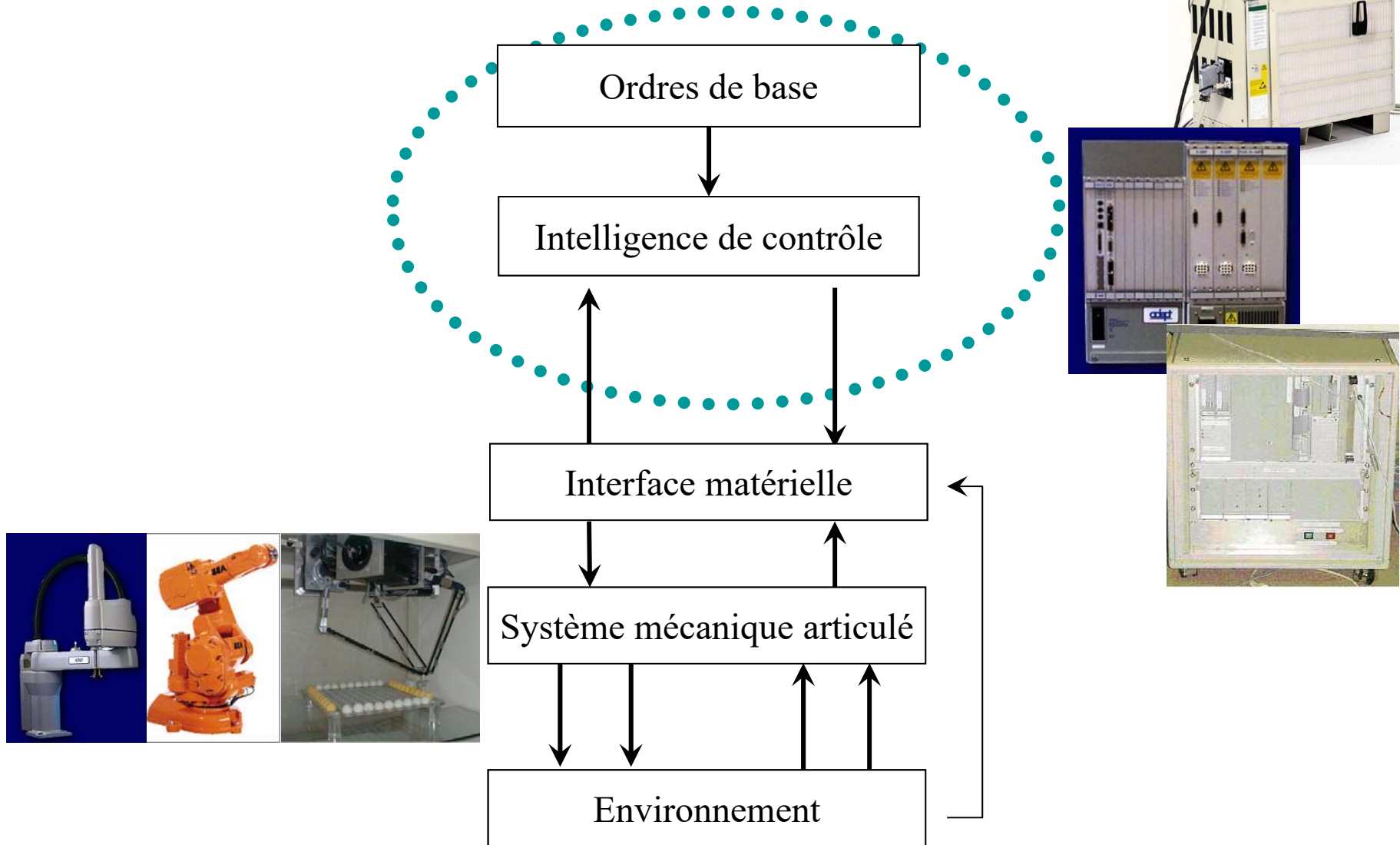
## Armoire de commande:

- Intelligence
- Cartes E/S pour les axes,
- Cartes E/S pour la sécurité,
- Etage de puissance,
- Connectique.

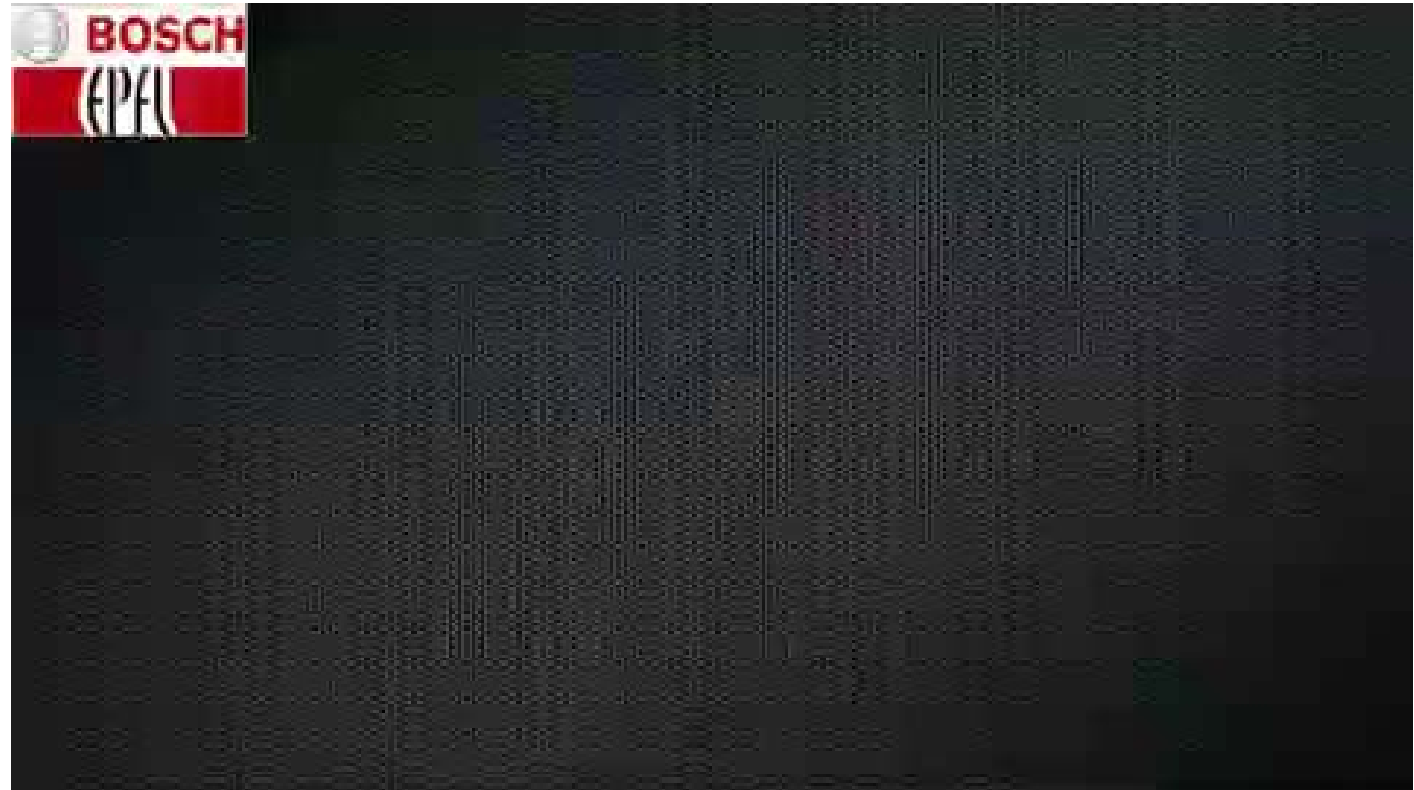
## Câblage:

- puissance,
- signaux.

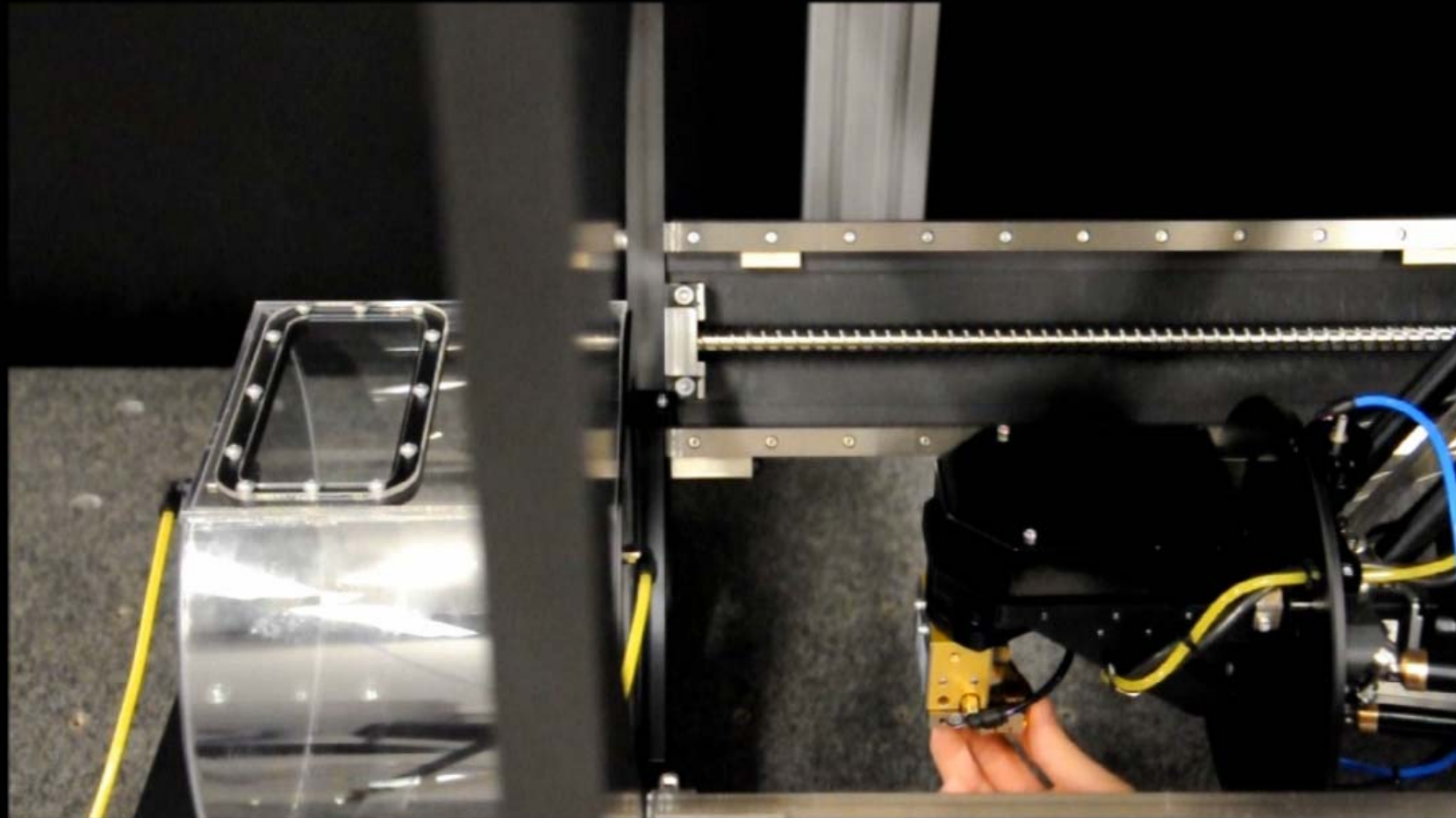
# Robot : Structure générale



## Direct Drive Actuated Delta realized for **BOSCH Packaging Technology**



[Patent 2015] Device For Moving And Positioning An Object In Space, Huser M., Tschudi M., Keiffer D., Teklits A., Bouri M., Clavel R., Demareux MO., Device For Moving And Positioning An Object In Space, reference WO2012152559



## Ouverture de la pince

# MINANGLE CONCEPT

Flexure-based tilting platform  
for high rotation amplitudes ( $\pm 15^\circ$ )

Laboratoire de Systèmes  
Robotiques LSRO  
<http://lsro.epfl.ch>

# Qu 'allons nous faire?

## **1. Aspect réglage :**

- Algorithmes de réglage,
- Génération de trajectoires,
- Génération de profils

## **2. Aspect matériel:**

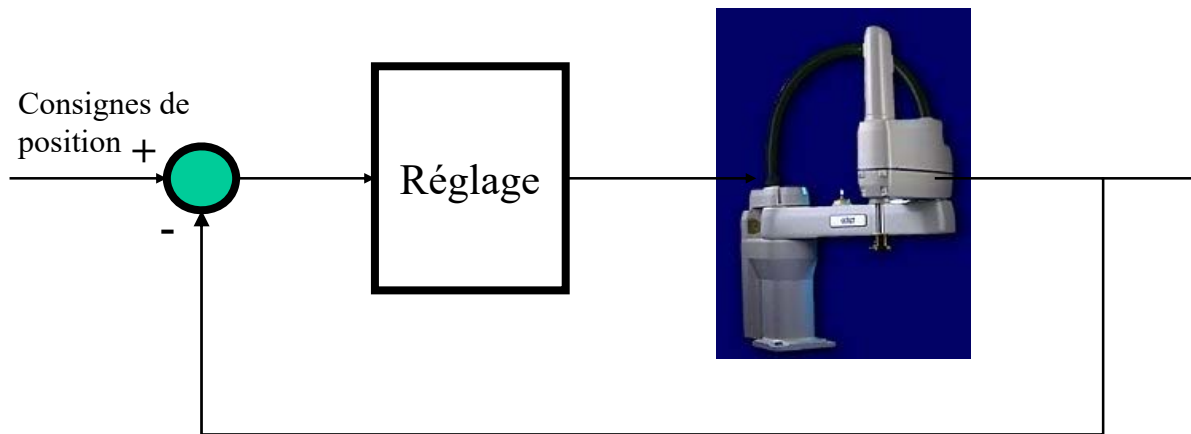
- Composants pour l 'interfacage avec les axes
- Puissance et sécurité,
- Embarquement de l 'intelligence: bus et cartes processeurs.

## **3. Aspect logiciel:**

- Structure multitâche d 'un logiciel de commande,
- Besoin de temps réel,
- Outils de développement

# Première partie

## Objectif Asservissement

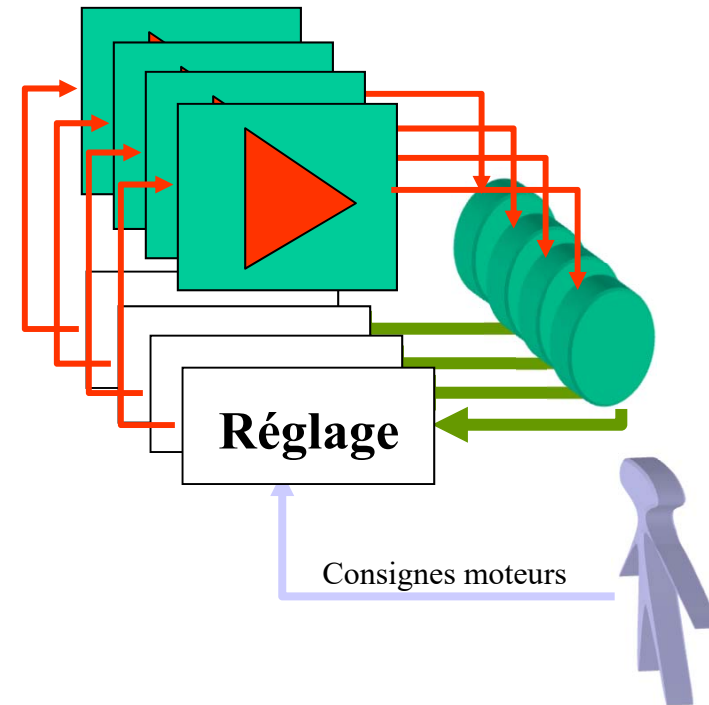
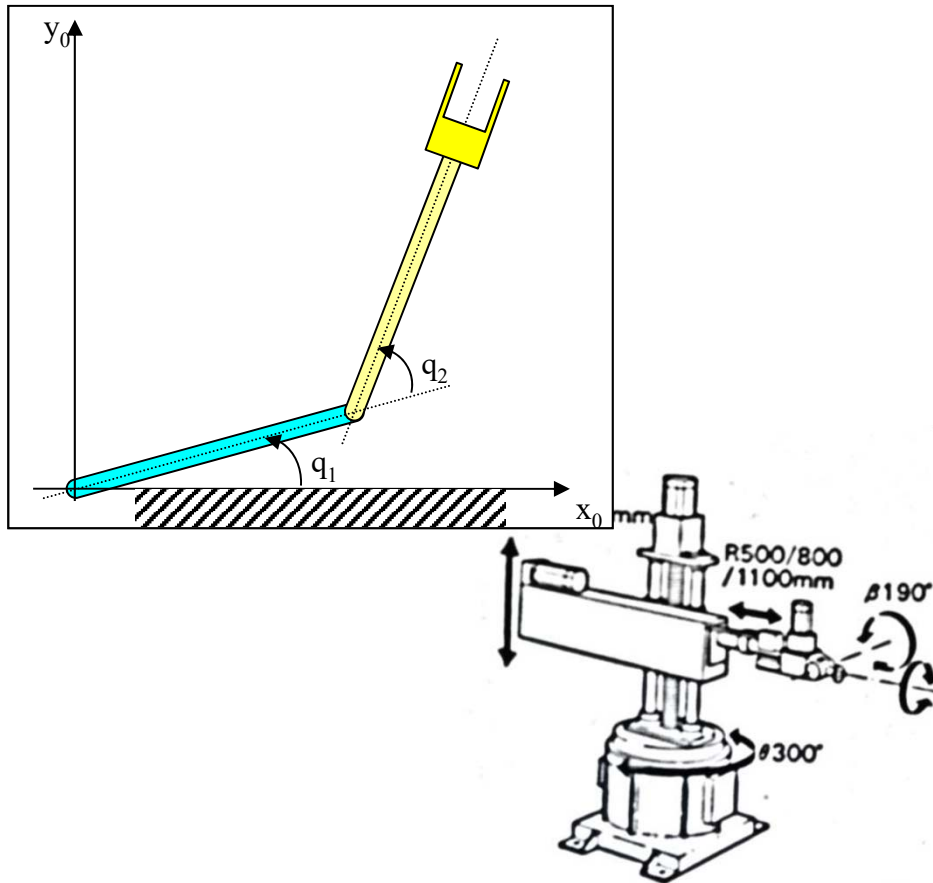




# Première partie

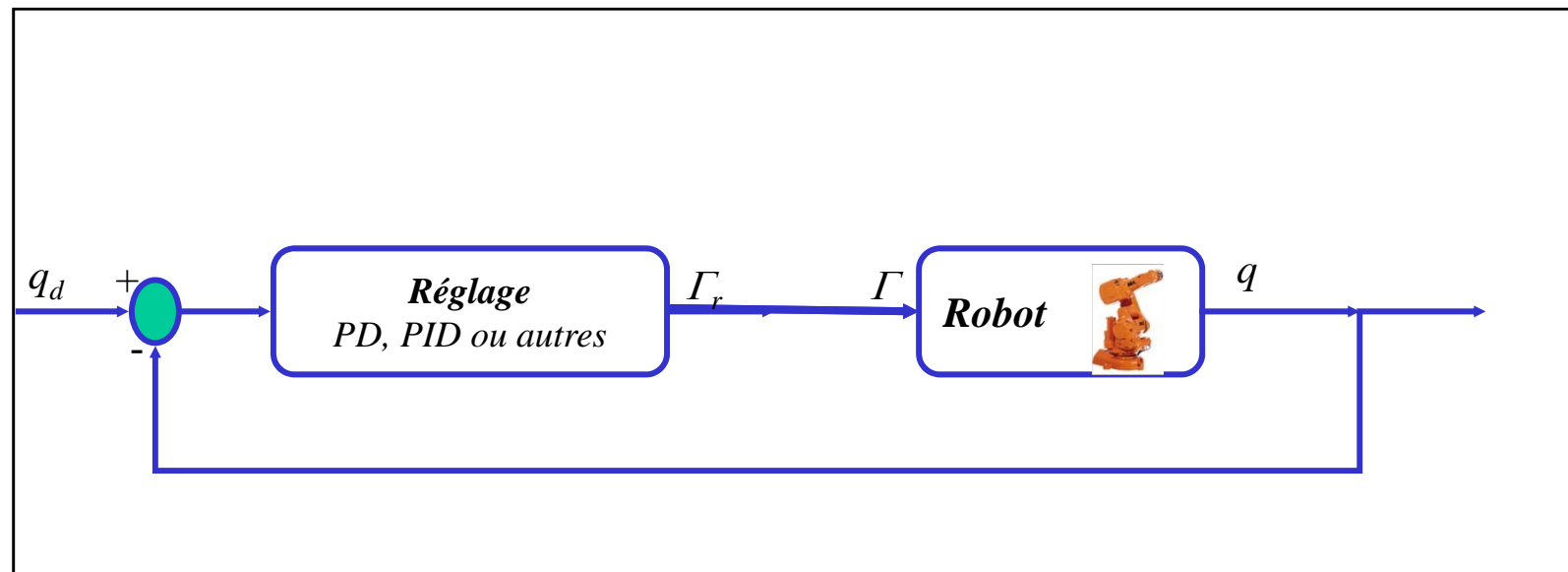
## Objectif Asservissement

### Possibilité 1 -



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

# Commande la plus simple Décentralisée



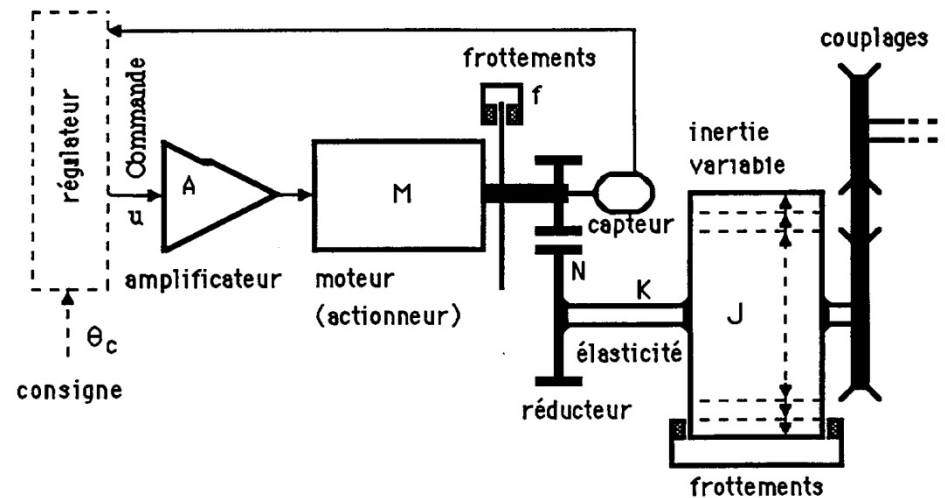
- **1 régulateur / axe**
- **Tous les régulateurs sont indépendants**

## Eléments de base

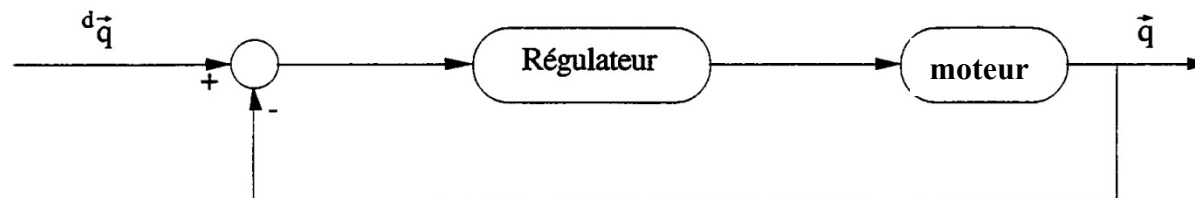
### Asservissement d'un axe de robot

#### A savoir:

- la commande du moteur électrique est effectuée en **tension** ou en **courant**?



*commande de moteur*



## Rappel: système second ordre

Un système électromécanique (Moteur + Transmission + Charge) est un système de second ordre d'**entrée**  $\theta_d$  et de **sortie**  $\theta$  ( $\theta_d$  est la consigne de position et  $\theta$  est la position à asservir).

La fonction de transfert (représentation linéaire) de ce système électromécanique correspond à un système asymptotiquement stable

**ssi**

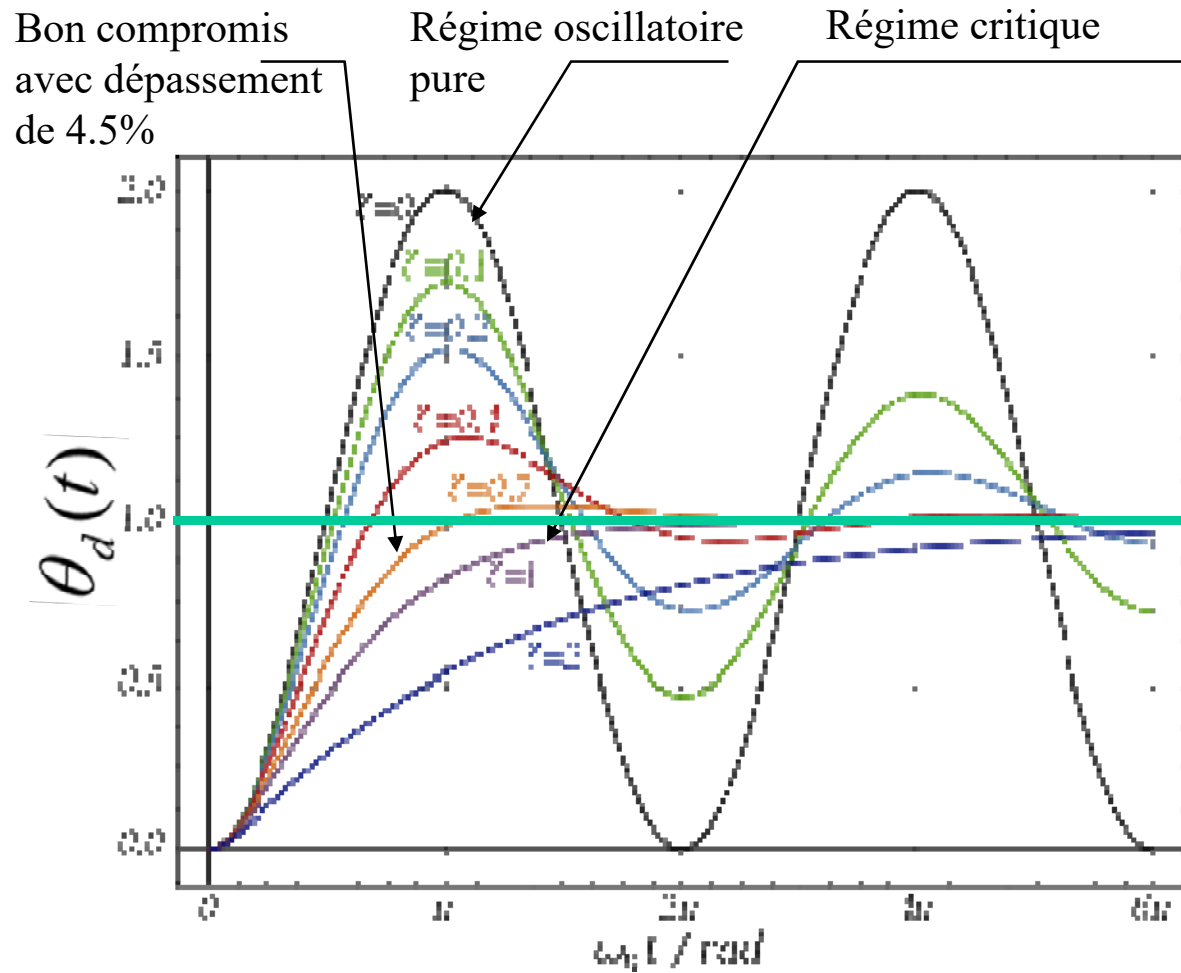
elle se met sous la forme:

$$\frac{\theta}{\theta_d} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2 \cdot z \cdot \omega_n \cdot s + \omega_n^2}$$

↙
↘

**coefficient d'amortissement**
**pulsation propre**

Réponses types d'un système de second ordre linéaire en fonction du temps normalisé par rapport à la fréquence propre.



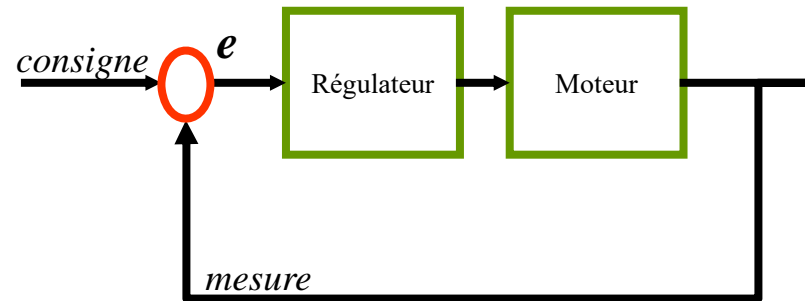
## Contrôleurs P, PD, PID

les contrôleurs P, PD et PID  
sont les contrôleurs de base à connaître

$$\underline{P} \rightarrow u = K_p \cdot e$$

$$\underline{PD} \rightarrow u = K_p \cdot \left( e + T_d \cdot \frac{de}{dt} \right)$$

$$\underline{PID} \rightarrow u = K_p \cdot \left( e + T_d \cdot \frac{de}{dt} + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau \right)$$



# Contrôleurs P, PD, PID

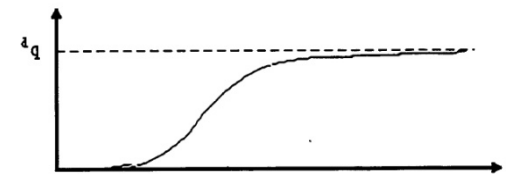
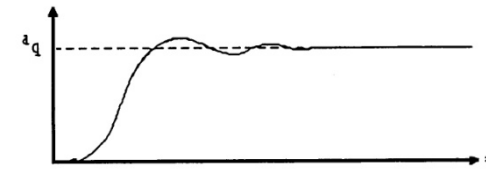
## A quoi servent ces paramètres?

- $K_p$  améliore la rapidité de réponse
- $T_d$  permet de rajouter de l'amortissement pour éviter les oscillations
- $T_i$  améliore le statisme dans la réponse du système à régler.

P      $\Rightarrow u = K_p \cdot e$

PD      $\Rightarrow u = K_p \cdot \left( e + T_d \cdot \frac{de}{dt} \right)$

PID      $\Rightarrow u = K_p \cdot \left( e + T_d \cdot \frac{de}{dt} + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau \right)$



**IMPORTANT  
NOTICE**

## P / PD and PID position control of a DC motor

Développements détaillés et remarques 😊

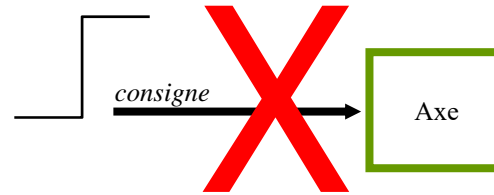
Document Moodle associé:

CommandePID\_DC\_motor.pdf sur moodle



# Ajustement des paramètres PID

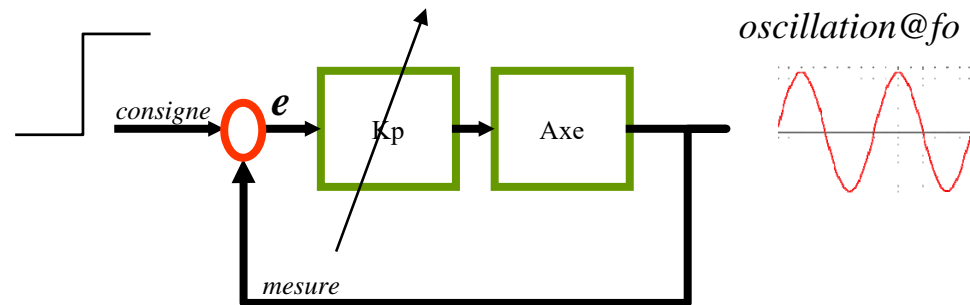
Ziegler-Nichols, Open Loop



Méthode à éviter car le système s'emballe en absence d'amortissement !

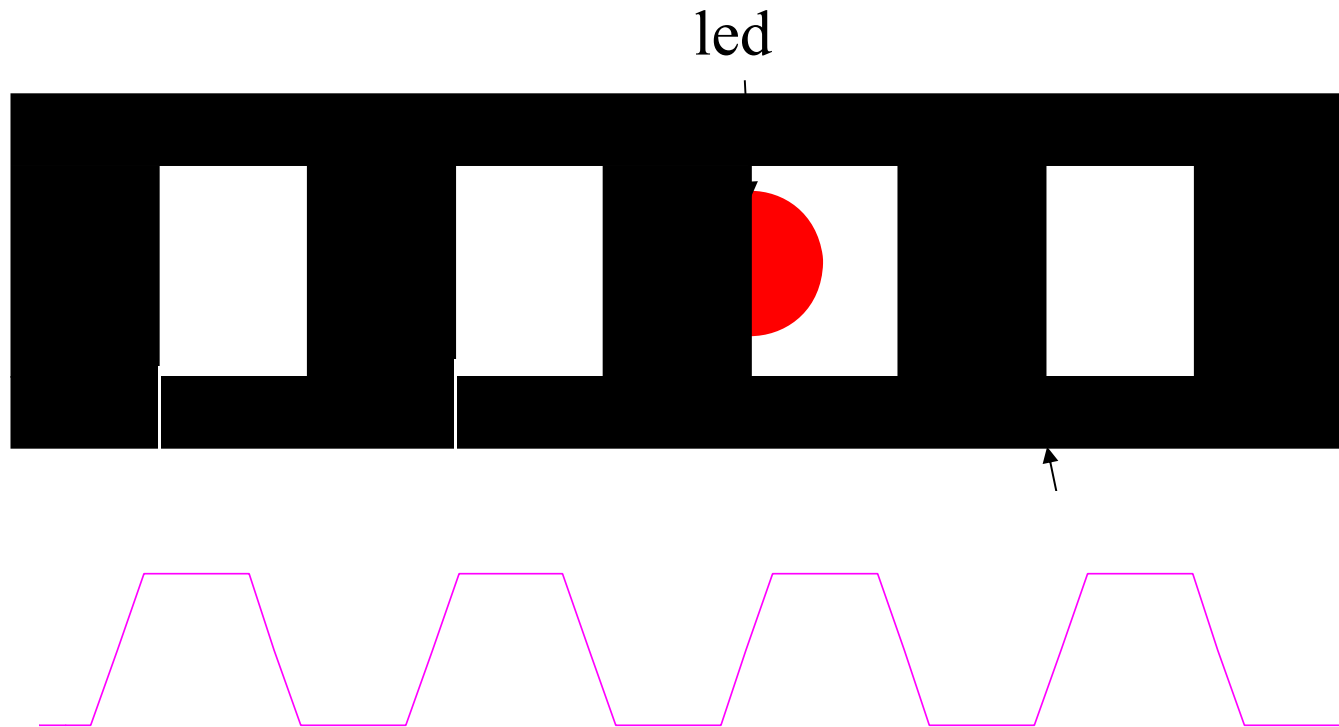
Ziegler-Nichols, closed loop

$$K_p = .6K_o, \quad Nm / rad$$
$$K_i = 2f_o K_p, \quad Nm / (rad \cdot sec)$$
$$K_d = \frac{K_p}{8f_n}, \quad Nm / (rad / sec)$$



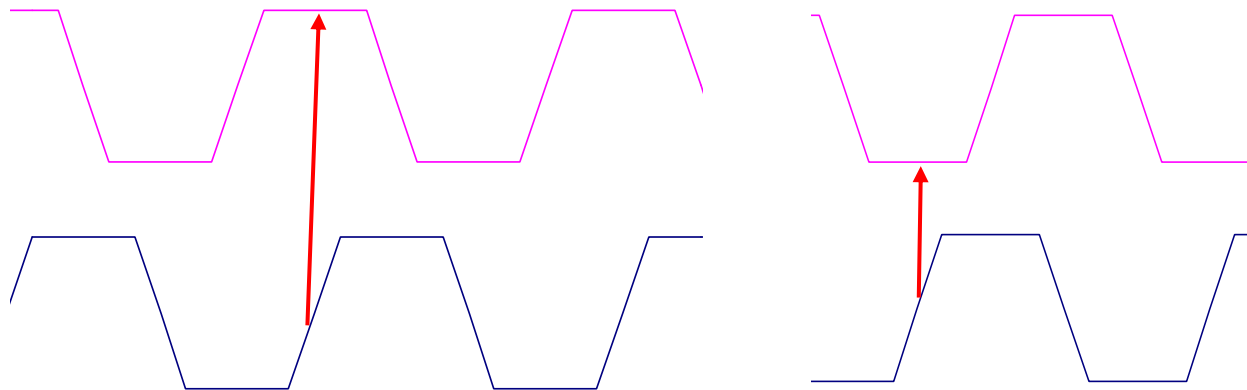
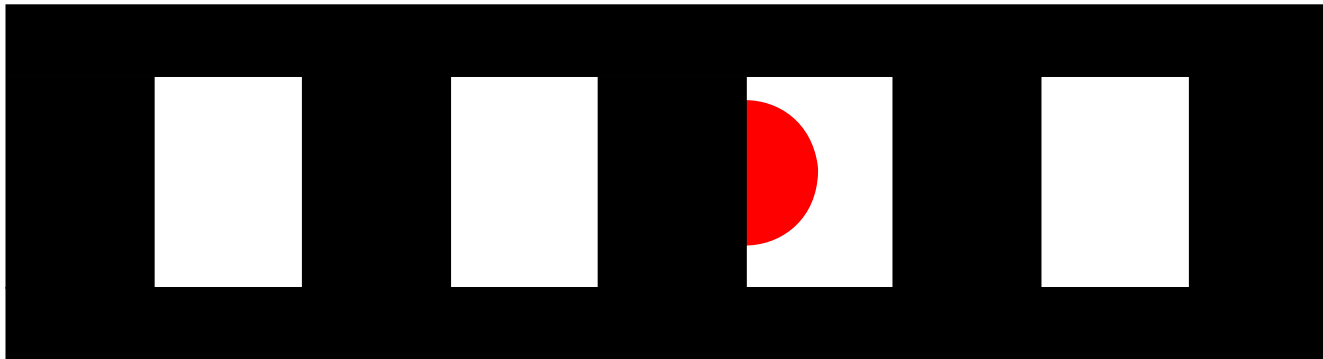
**Autres méthodes ????**

## Encoders (working principle)

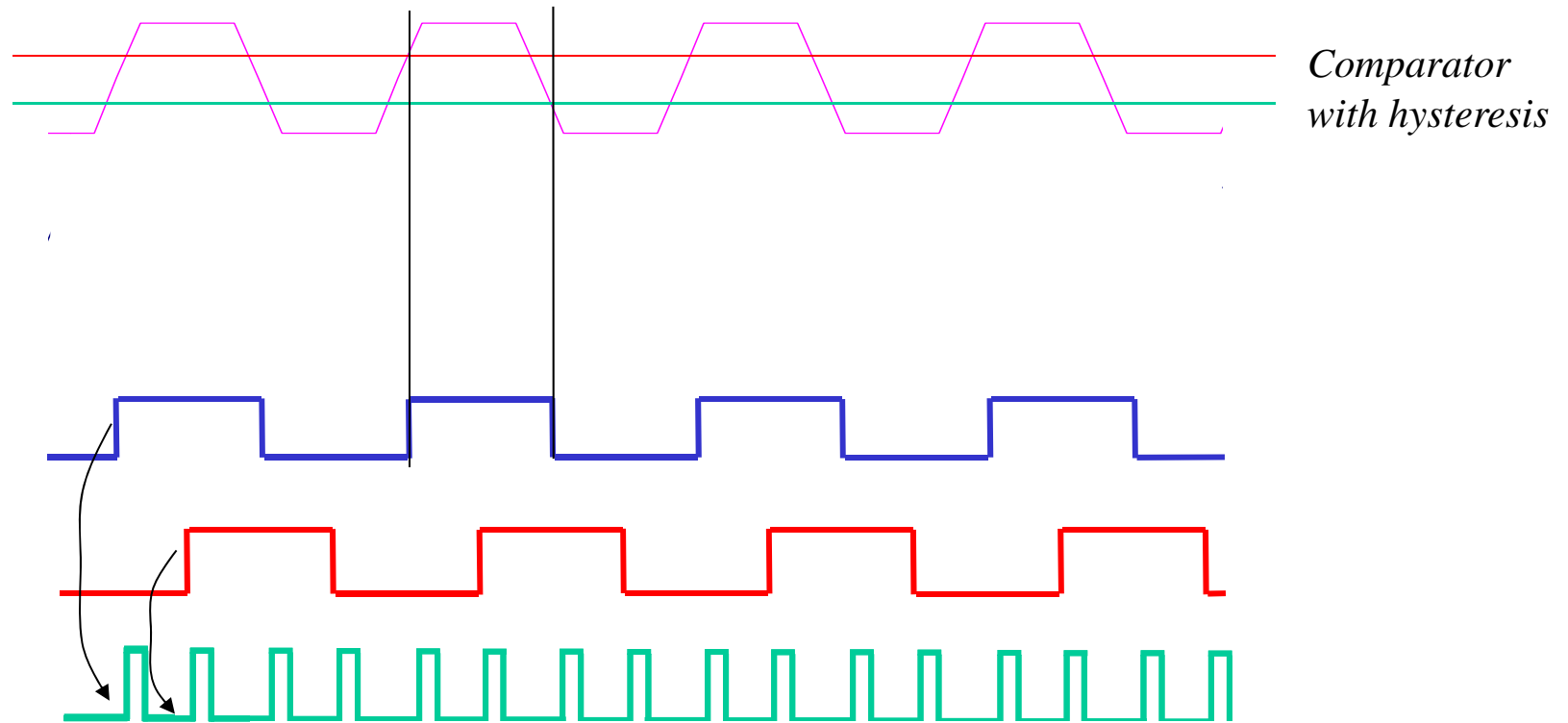


*How to discriminate the direction?*

## Encoders (direction detection)



## Encoders (signal conditioning)



*The resolution is multiplied by 4!*

# Réglage : Problème de résolution



## capteurs position:

- analogique
- encodeurs incrémentaux



## capteurs vitesse:

- tachymétrique
- dérivation numérique

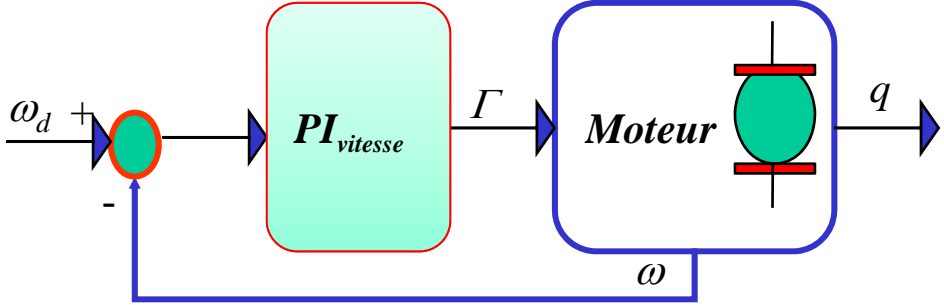
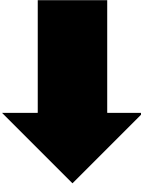
Dérivation numérique     $w(k) = \frac{\theta(k) - \theta(k-1)}{T_e}$     ou     $w(k) = \frac{\theta(k) - \theta(k-2)}{2.T_e}$

Résolution     $R(w) = \frac{R(\theta)}{T_e}$     ou     $R(w) = \frac{R(\theta)}{2.T_e}$

$T_e$  : période d'échantillonnage  
 $R()$  : Résolution

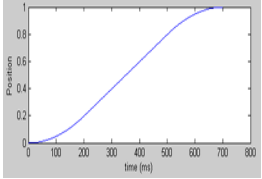
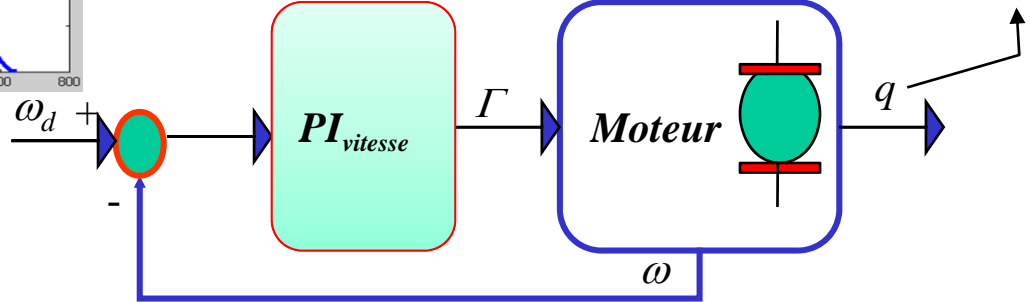
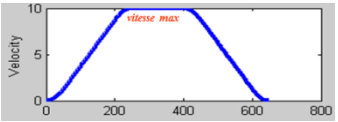
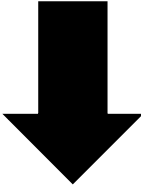
# Commande cascadée

## 1- Boucle de vitesse

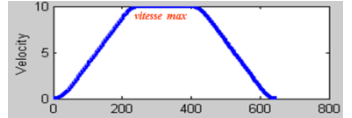


## 2- Boucle de vitesse

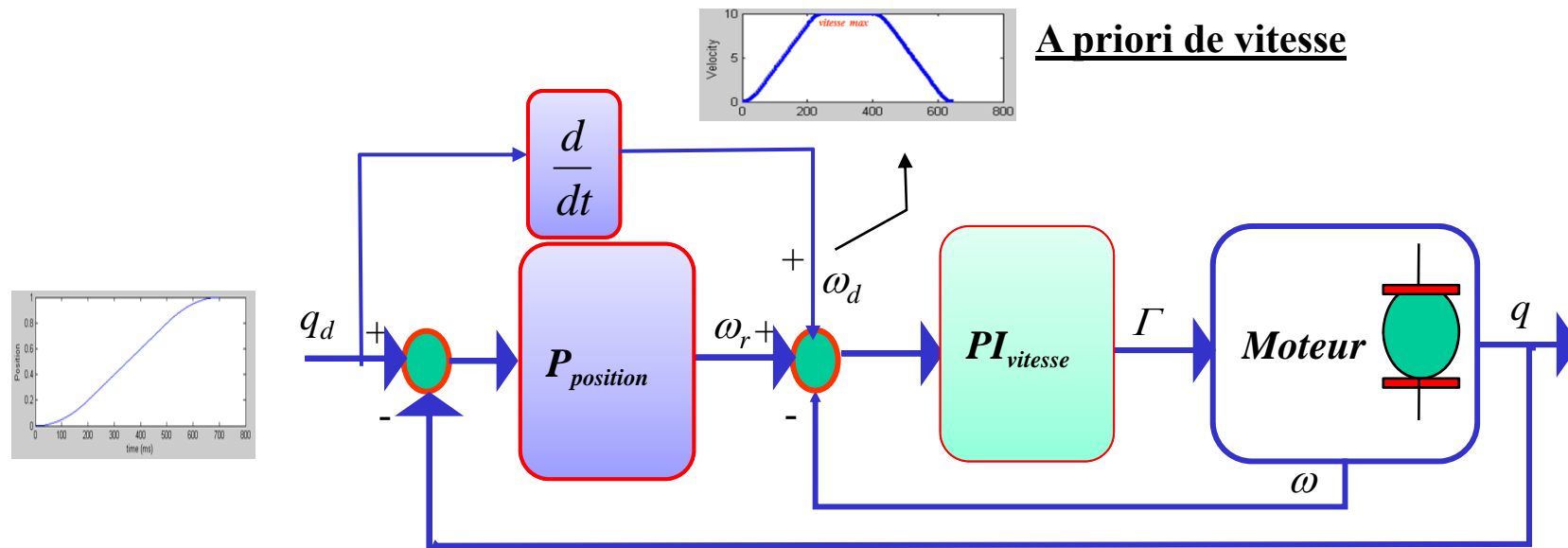
Ou  
Boucle ouverte en Position



## 3- Comment fermer la boucle sur la position



# Commande cascadée



## Avantages de la double boucle

1. Découplage des objectifs (position / vitesse)
2. Simplicité de mise en œuvre des paramètres de réglage
3. Double échelle de temps (position / vitesse)
4. Robustesse du contrôle

# *Non linéarités et compensation dynamiques*



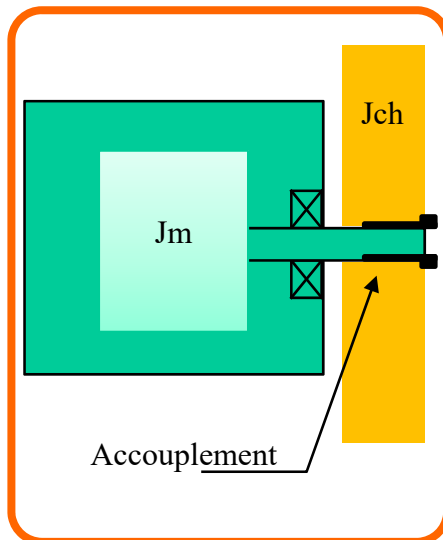
# Le modèle dynamique

## Axe seul....

Le modèle dynamique d'un axe (Moteur + Transmission + charge) est l'équation mathématique du comportement physique (dynamique) de cet axe vis-à-vis d'une action en couple.

## Le système le plus simple du monde

Un moteur d'inertie  $J_m$  + une charge inertielle tournante d'inertie  $J_{ch}$  (inclut l'accouplement)



$$\sum M = \Gamma_m = (J_m + J_{ch})\ddot{\theta}^*$$

La connaissance a priori des lois de mouvement (position, vitesse et accélération) implique la connaissance a priori du couple nécessaire à la réalisation du mouvement désiré. C'est ce couple que nous appelons :

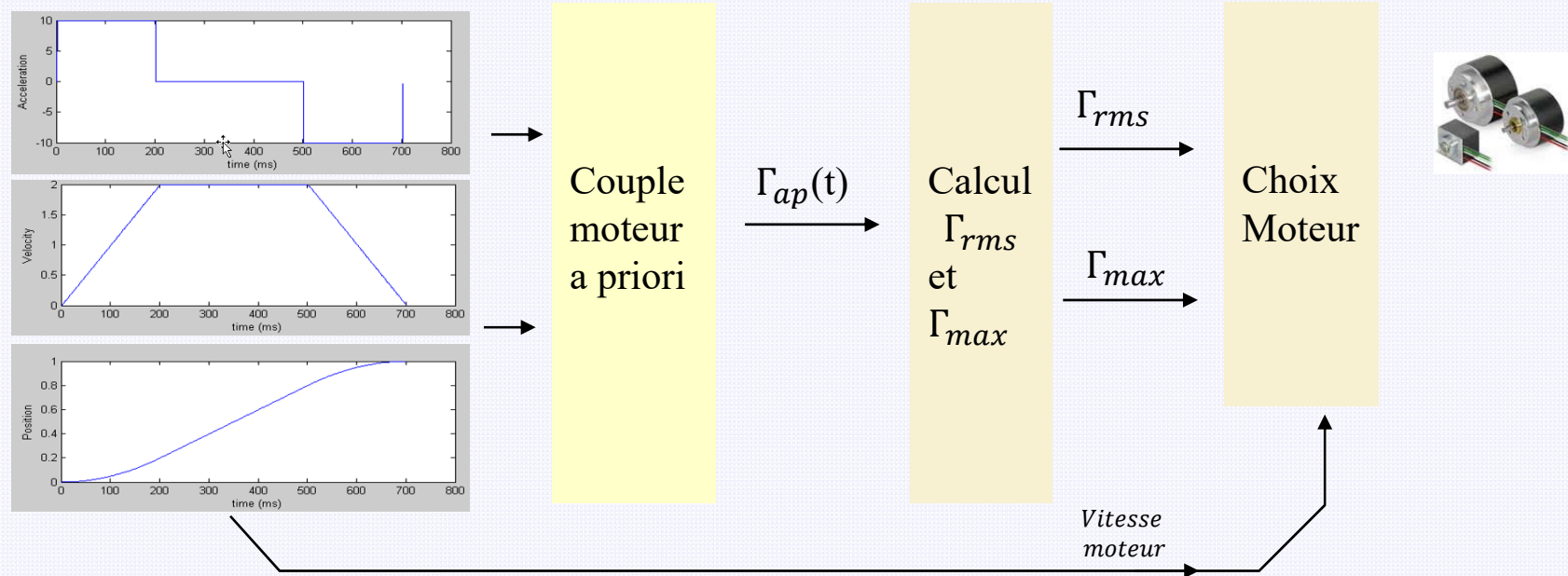
- **Modèle dynamique inverse** (Couple en fonction des trajectoires issues des lois de mouvement).
- **Modèle dynamique a priori**

\* Ce modèle suppose le système sans frottement sec ni visqueux

**Rappels. Soient :**

- $\theta_d$  le profil de mouvement de la position désirée
- $\dot{\theta}_d$  le profil de mouvement de la vitesse désirée
- $\ddot{\theta}_d$  le profil de mouvement de l'accélération désirée

$$\Gamma_{ap} = \Gamma_m(\theta = \theta_d, \dot{\theta} = \dot{\theta}_d, \ddot{\theta} = \ddot{\theta}_d) = \underline{(J_m + J_{ch})\ddot{\theta}_d}$$



Cahier des charges  
(spécifications)

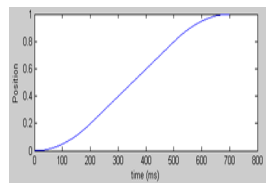
Conception  
Et Choix

**La connaissance de ce modèle a priori** implique la maîtrise du couple nécessaire à la réalisation des trajectoires désirée (Pour l'instant il s'agit d'un seul axe).

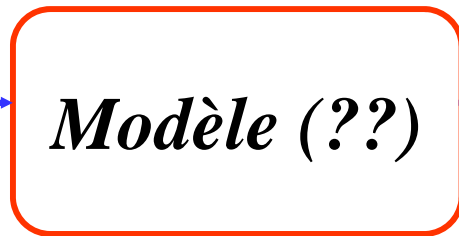
Si le modèle théorique obtenu **correspond exactement au comportement du modèle de construction**, alors il suffirait d'appliquer la couple a priori (issu des lois de mouvement) au moteur de l'axe pour que ce dernier génère exactement la position, vitesse et accélération désiré. C'est uniquement une inversion de modèle.

*Principe*

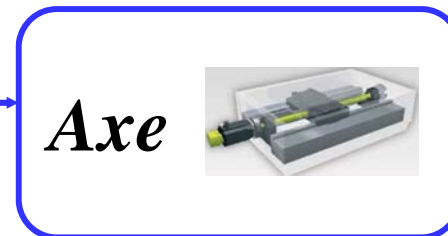
Boucle ouverte



$\theta_d(t)$   
ou  
 $x_d(t)$



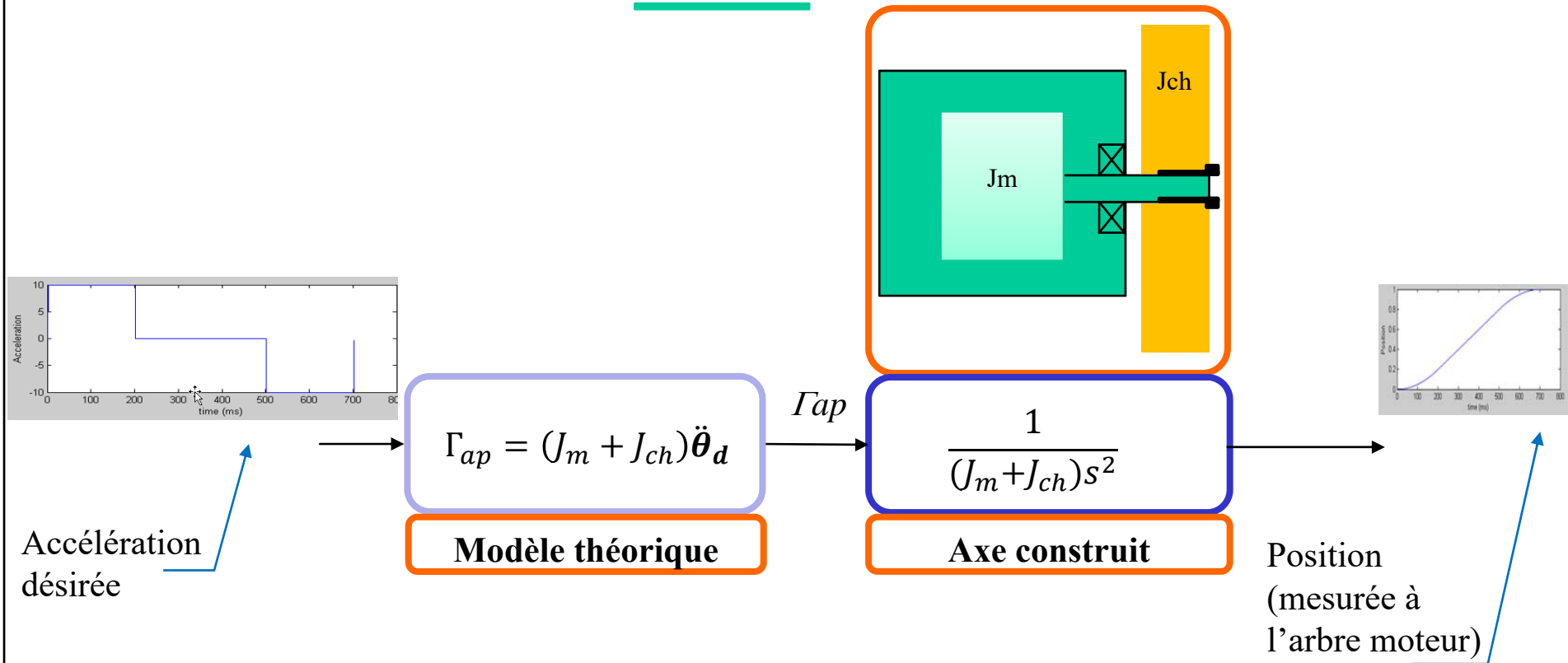
$\Gamma_{ap}$



$\theta(t)$   
ou  
 $x(t)$

## Dans le cas de l'exemple précédent

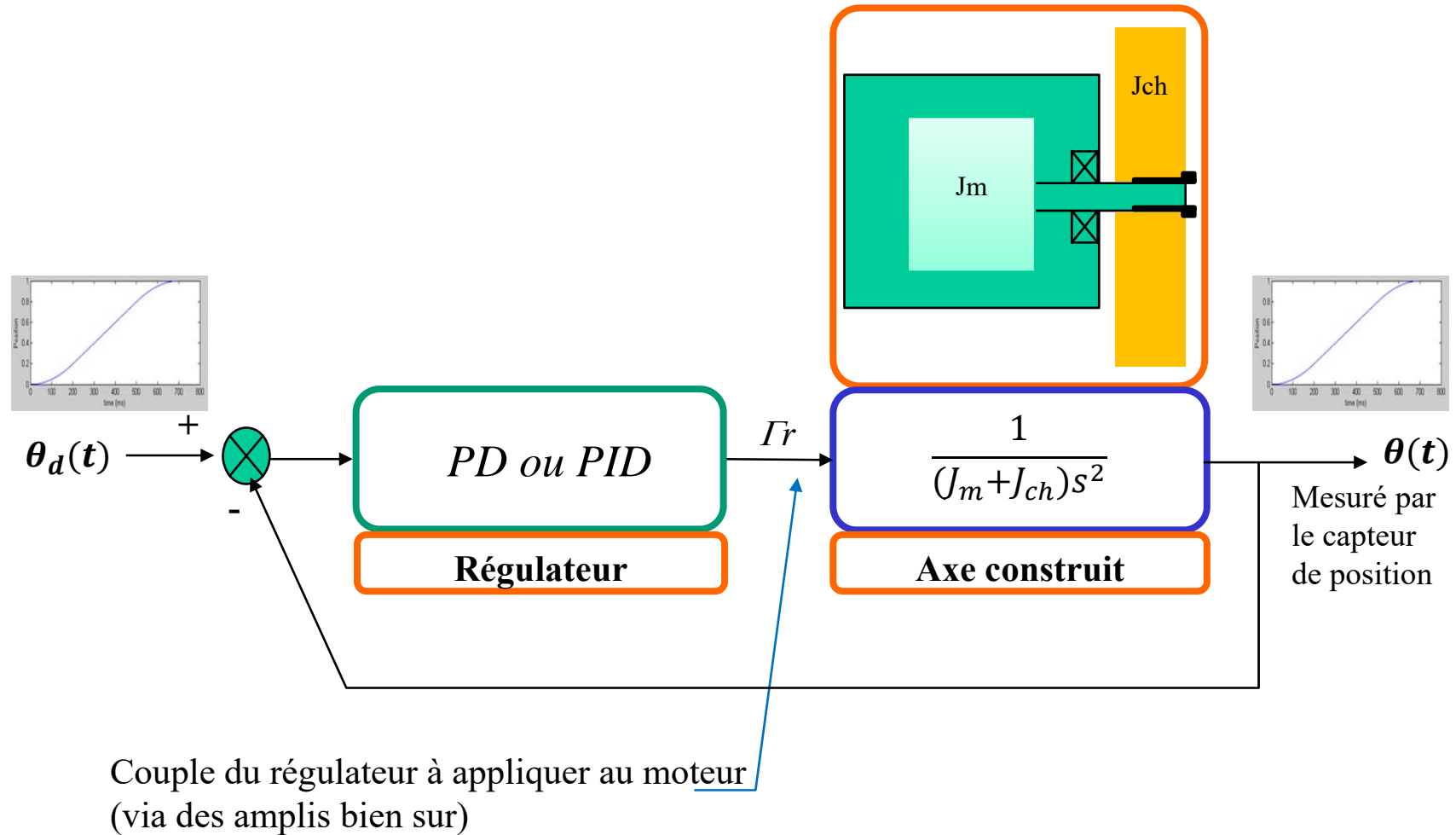
$$\Gamma_{ap} = \Gamma_m(\theta = \theta_d, \dot{\theta} = \dot{\theta}_d, \ddot{\theta} = \ddot{\theta}_d) = \underline{(J_m + J_{ch})\ddot{\theta}_d}$$



Si les inerties utilisées dans le calcul du modèle a priori correspondent exactement aux inerties du système construit, nous retrouvons à la sortie de notre moteur exactement la position désirée (issue de la double intégration de l'accélération désirée)

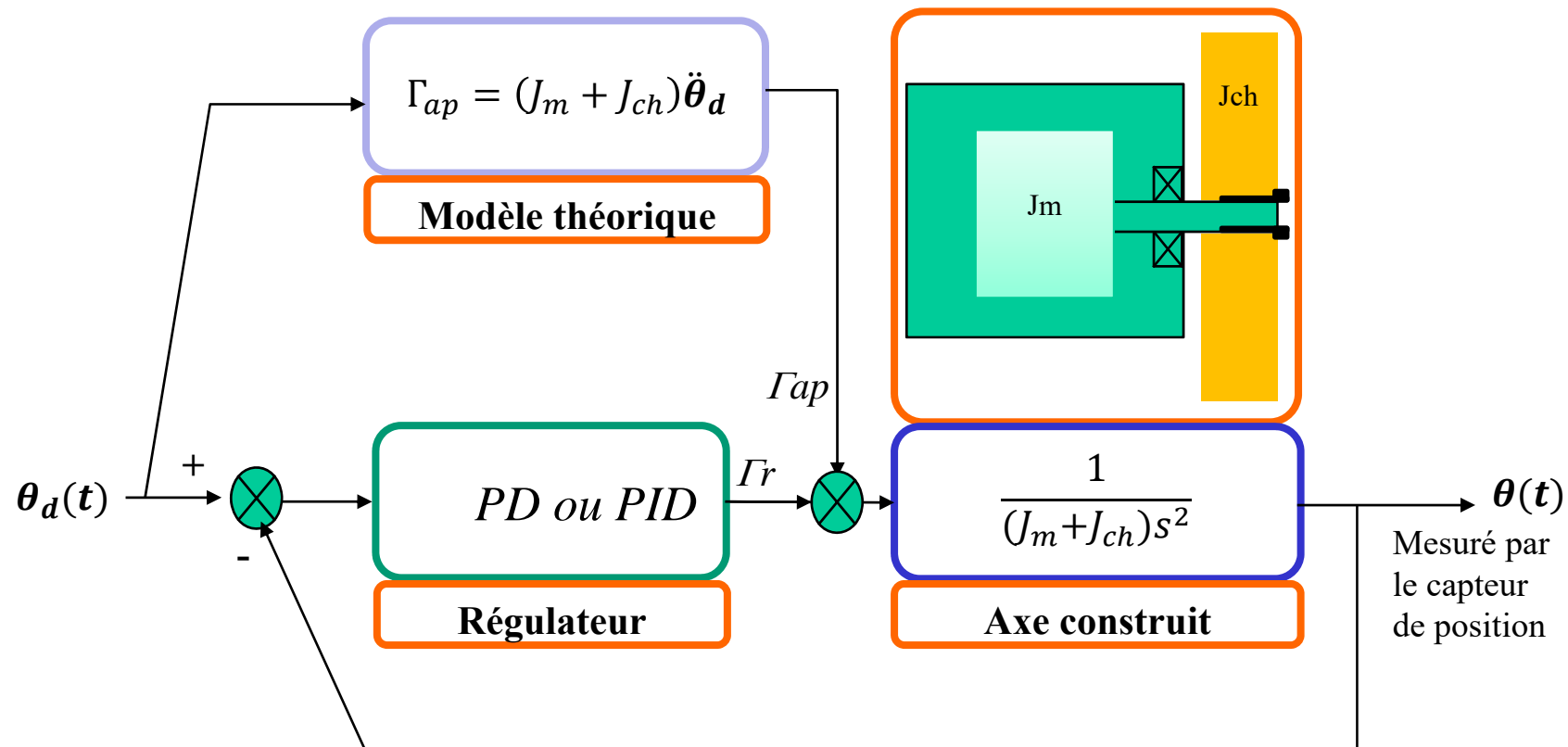
## Pour rappel,

Le rôle d'un régulateur est de trouver le couple à appliquer au moteur pour que ce dernier réalise le mouvement désiré.



L'idéale est donc de combiner ces deux outils pour le même objectif : **asservissement au mieux de la position du moteur à la trajectoire désirée.**

- Le couple à priori servira s'approcher rapidement des couples nécessaires à la réalisation du mouvement.
- Le régulateur pour fermer la boucle de position.



## **Très important :**

Dans le cas de l'exemple précédent l'apport du couple a priori est nulle en phase statique.

**Dans quel cas l'apport statique du modèle dynamique a priori n'est pas nulle?**

## **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.