



Robotique

Manipulation et commande

Université de Strasbourg

Telecom Physique Strasbourg, option ISAV

Master IRIV, parcours AR

Chapitre 5 – Commande

Plan du chapitre

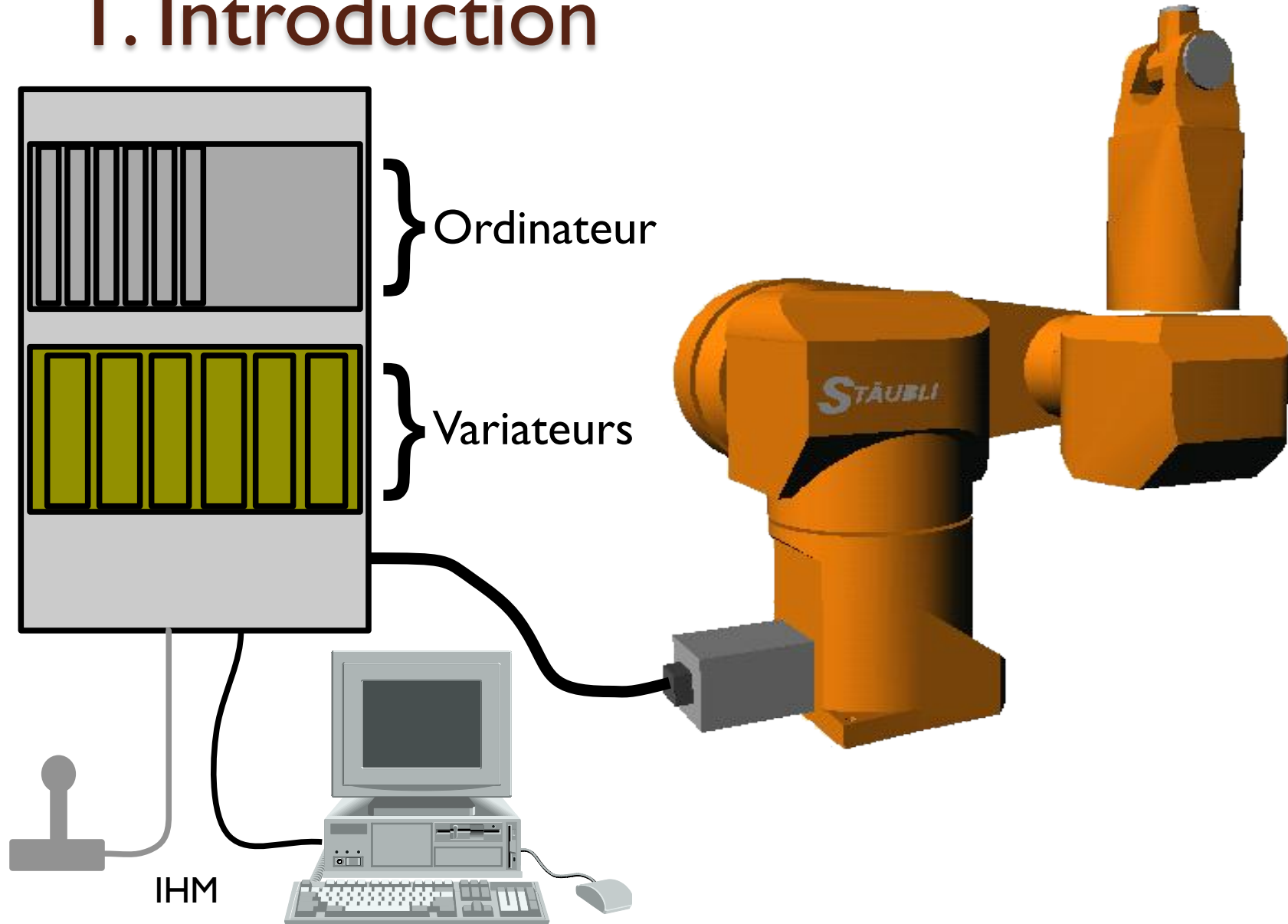
- 1. Introduction
- 2. Commande articulaire
- 3. Génération de trajectoire
- 4. Architecture logicielle

I. Introduction

- **Commande d'un robot**

- Commander les positions des actionneurs pour qu'ils suivent le plus précisément possible la consigne.
- Elle peut être décomposée en plusieurs sous-systèmes :
 - Ordinateur + **Interface Homme - Machine (IHM)**
 - Les variateurs = étages de puissance
 - Les capteurs
 - Les actionneurs
- Physiquement, l'ordinateur et les variateurs sont souvent regroupés dans une même armoire tandis que les capteurs et les actionneurs sont solidaires du robot.

I. Introduction



I. Introduction

- **Ordinateur**

- Processeur(s), mémoire, stockage de masse
- Interfaces vers le robot : CNA, CAN, compteurs, E/S TOR, ...
- Interfaces vers l'utilisateur : liaison série, ethernet, USB, bus de terrain, ...

- **Variateurs (1 par axe)**

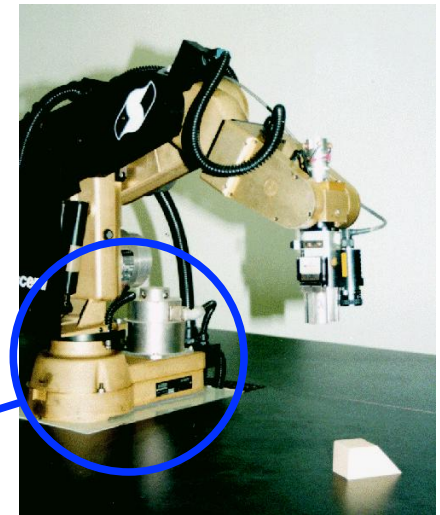
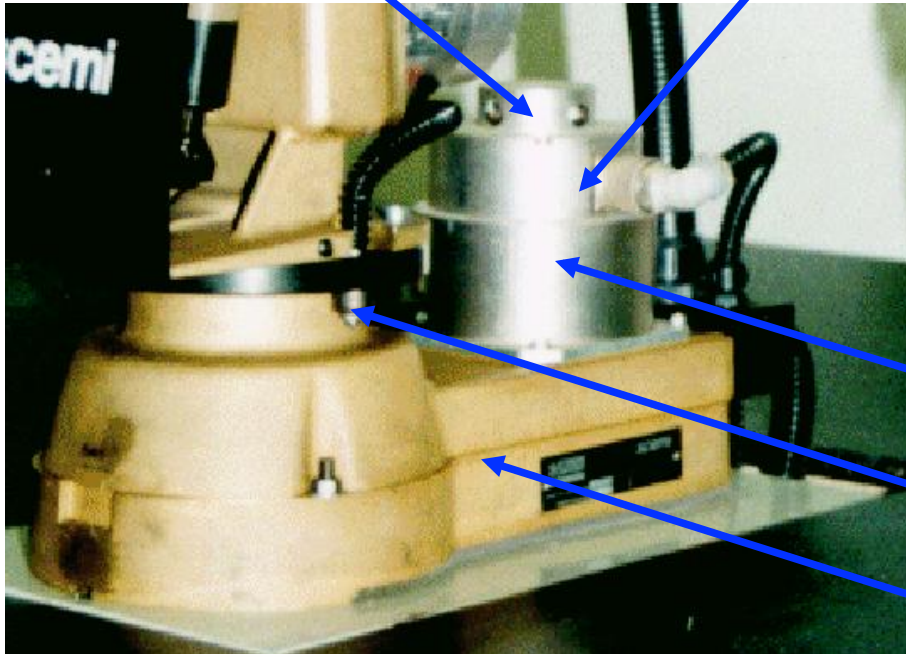
- Amplificateur (hacheur)
- Boucle de courant (toujours présente)
- Boucle de vitesse (optionnelle)
- Sécurités bas niveau (température, défaut interne, ...)

I. Introduction

- **Capteurs et actionneurs**

Capteur de vitesse

Capteur de position



Moteur

Capteur FC

Réducteur

2. Commande articulaire

2.1. Les actionneurs

- Les actionneurs électriques
 - Machines à courant continu
 - Machines synchrones
 - Machines asynchrones
- Les actionneurs hydrauliques
- Les réducteurs
- Les capteurs associés aux actionneurs

2. Commande articulaire

2.1.1 Les actionneurs électriques

- 3 types utilisés en robotique :
 - Moteur à courant continu
 - Moteur synchrone autopiloté (*DC brushless*)
 - Moteur asynchrone à commande vectorielle
- Caractéristiques propres à la robotique :
 - Bobinages statoriques à faible constante de temps (L/R)
 - Rotor à faible constante de temps mécanique (J/F)

2. Commande articulatoire

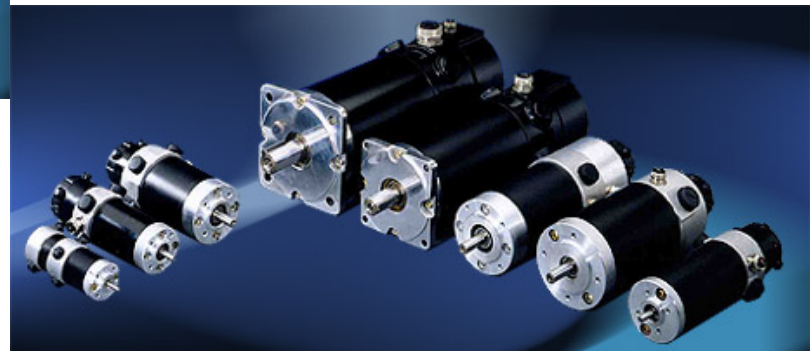
2.1.1 Les actionneurs électriques

- Facteurs de formes particuliers :
 - Moteurs longs et de faible diamètre
 - Moteurs à rotor plat
- Exemples :



Moteurs RS PARVEX™ →

→ Moteurs AXEM PARVEX™



2. Commande articulatoire

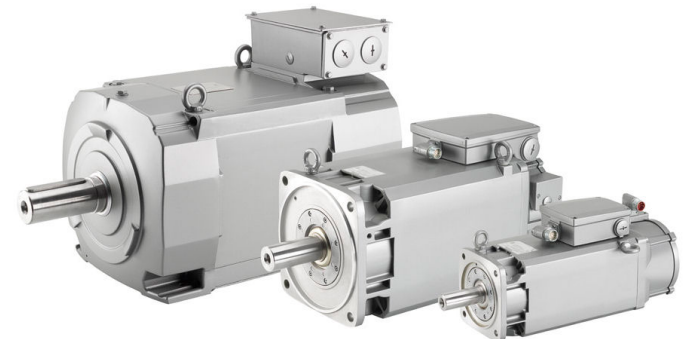
2.1.1 Les actionneurs électriques

- Moteurs brushless Maxon™



- Moteur asynchrones

- Siemens Simotic™
- Commande vectorielle

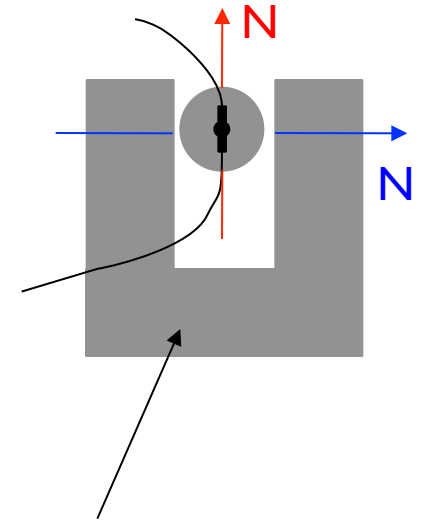


2. Commande articulaire

2.1.1 Les actionneurs électriques : principes

- **Fonctionnement du MCC**

- Champ statorique constant (souvent aimant permanent).
- Rotor bobiné alimenté en courant continu via des contacts glissants (collecteur).
- Couple proportionnel au courant rotorique (courant induit).
- Commutation électromécanique : étincelles, frottements, usure.
- Historiquement la première machine utilisée en robotique.



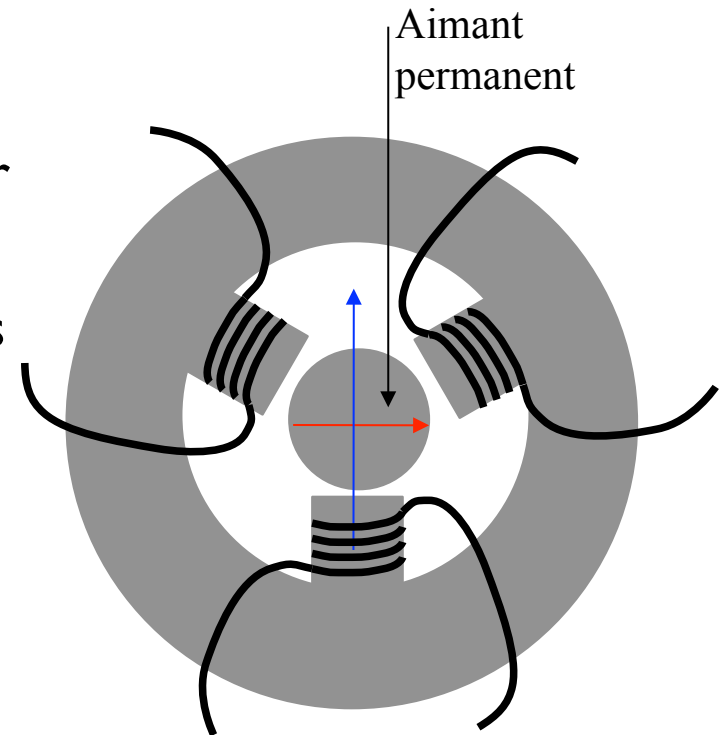
Aimant permanent

2. Commande articulaire

2.1.1 Les actionneurs électriques : principes

- **Fonctionnement du MS**

- Champ permanent au rotor (souvent un aimant).
- Stator triphasé. Les bobines du stator sont commutées électroniquement.
- Pas de contact glissant (moteur *DC brushless*)
- Nécessité d'un capteur de position rotorique pour la commande.

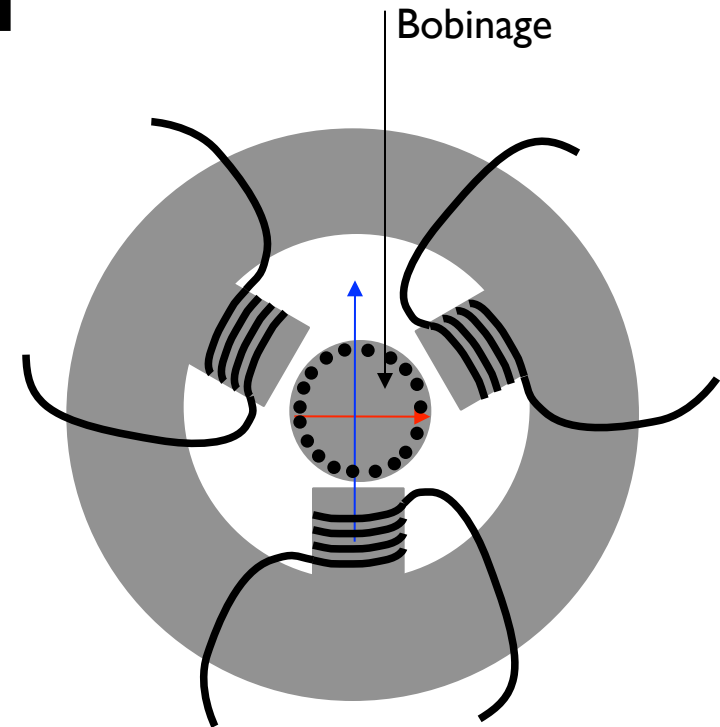


2. Commande articulaire

2.1.1 Les actionneurs électriques : principes

- **Fonctionnement du MAS**

- Rotor : bobinage en court-circuit.
- Courant rotorique induit par le différentiel entre la vitesse angulaire du champ statorique et du rotor (*Induction motor*)
- Pas d'aimant. Pas de frottement.



2. Commande articulaire

2.1.1 Les actionneurs électriques : comparatif

	MCC	MS	MAS
Maintenance	***	**	*
Puissance massique	*	***	**
Performances dynamiques	*	***	**
Complexité de la commande	*	**	***
Coût variateur + commande	**	**	***

* Peu
** Moyen
*** Beaucoup

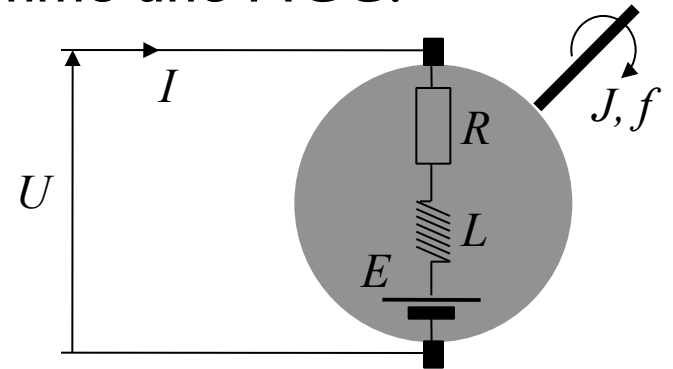
La machine synchrone est actuellement le meilleur compromis en robotique.

2. Commande articulaire

2.1.1 Les actionneurs électriques : modèle

- **Modélisation dynamique**

- Les 3 machines accompagnées de leur variateur se comportent à peu près comme une MCC.
- Γ : couple moteur
- Ω : vitesse angulaire
- J : inertie rotorique
- f : frottement visqueux
- R : résistance rotorique
- L : inductance rotorique
- E : force contre-électromotrice



2. Commande articulaire

2.1.1 Les actionneurs électriques : modèle

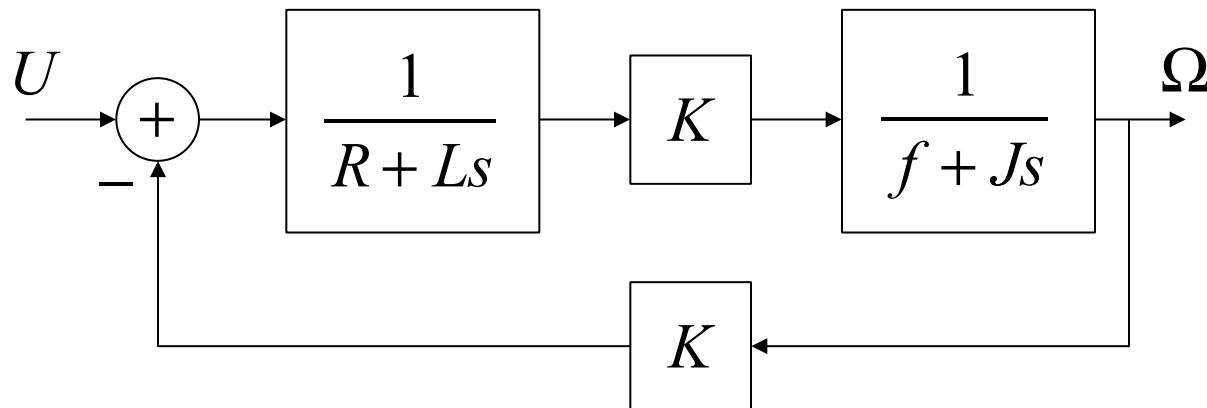
- Equation électrique :

$$u - e = Ri - L \frac{di}{dt} \Leftrightarrow \frac{I(s)}{U(s) - E(s)} = \frac{1}{R + Ls}$$

- Equation mécanique :

$$\gamma - f\omega = J\dot{\omega} \Leftrightarrow \frac{\Omega(s)}{\Gamma(s)} = \frac{1}{f + Js}$$

- Equation électromécanique : $\Gamma = KI$ $E = K\Omega$



2. Commande articulaire

2.1.1 Les actionneurs électriques : modèle

- **Transfert entre tension et vitesse :**

- On a :

$$\Omega(s) = \frac{K}{(R + Ls)(f + Js) + K^2} U(s)$$

- D'où :

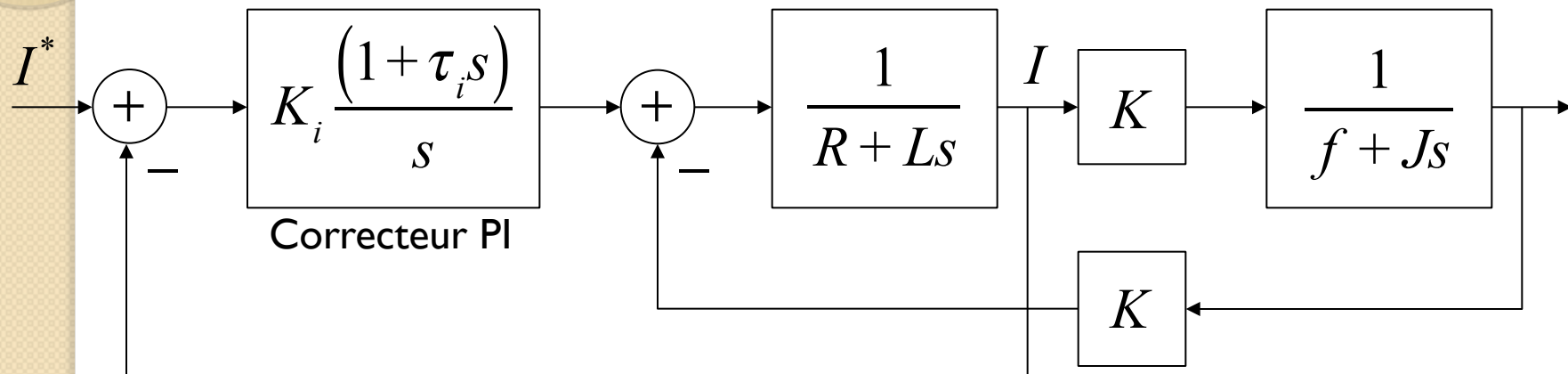
$$\frac{\Omega(s)}{U(s)} = \frac{K}{LJs^2 + (RJ + Lf)s + Rf + K^2}$$

- Le moteur se comporte donc comme un second ordre. Sur un moteur de robot, l'amortissement peut être inférieur à 1.

2. Commande articulaire

2.1.1 Les actionneurs électriques : modèle

- Boucle de courant :



- Modèle de la boucle de courant :

$$\frac{I}{I^*} = \frac{K_i (1 + \tau_i s) (f + Js)}{LJs^3 + (RJ + Lf + K_i \tau_i J) s^2 + (Rf + K^2 + K_i J + K_i \tau_i f) s + K_i f}$$

2. Commande articulaire

2.1.2 Les actionneurs hydrauliques

- **Avantages**

- Important rapport (charge utile) / masse
- Robustesse

- **Inconvénients**

- Imprécision
- Prix

- **Exemple**

- Schilling TITAN 4™
- Charge utile : 450kg
- Masse du robot : 100kg

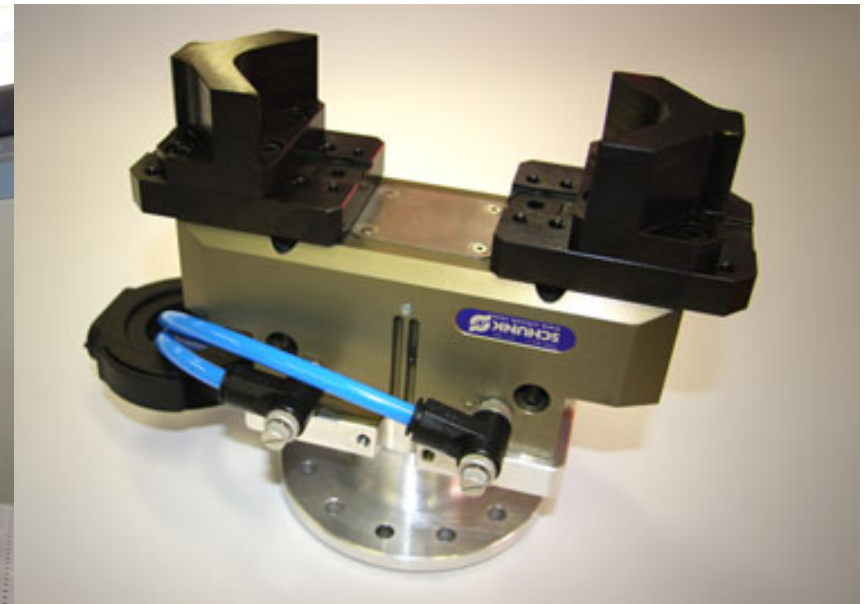


2. Commande articulaire

2.1.3 Les actionneurs pneumatiques

- **Usages**

- Pour les outils
- Préhension par dépression (*suction cup*)
- Vérins butée à butée



2. Commande articulaire

2.1.4 Les réducteurs

- **Harmonic drive™**

- Pas de jeu
- Jusqu'à $1/320$
- Compact
- Faible nb de pièces
- Silencieux
- Pas de vibrations
- Très bon rendement
- Inconvénient : élasticité



2. Commande articulaire

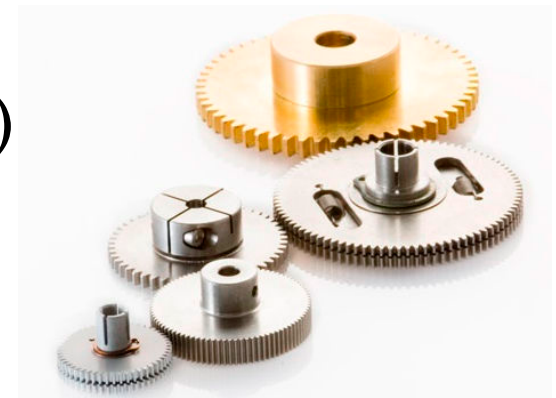
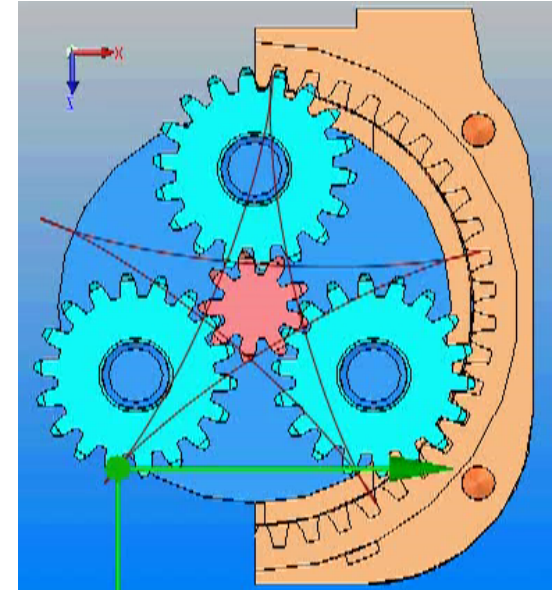
2.1.4 Les réducteurs

- **Train épicycloïdal**

- Compacité
- Rigidité
- Rapport de réduction élevé
- Faible jeu
- Rendement moyen

- **Train d'engrenages**

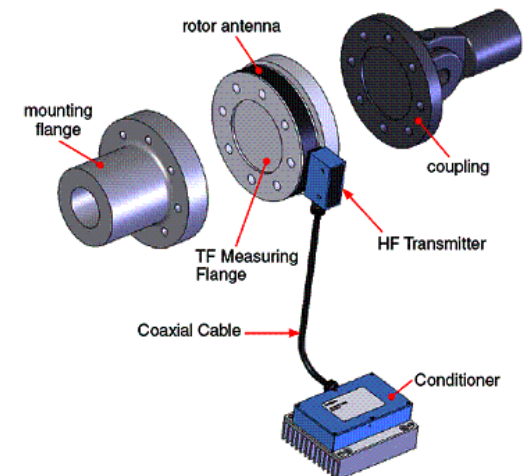
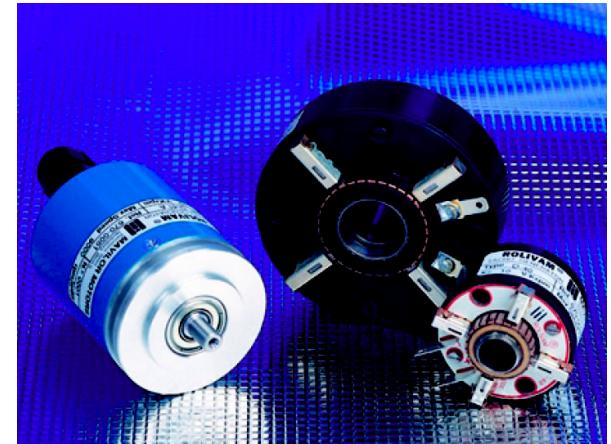
- Volumineux
- Jeu important (si pas compensé)
- Rendement médiocre
- Bruyant



2. Commande articulaire

2.1.5 Les capteurs associés aux actionneurs

- Capteurs de position
 - Capteur à effet hall
 - Codeurs incrémentaux
 - Codeurs absolus
 - Capteurs de fin de course
- Capteur de vitesse
 - Génératrice tachymétrique
- Capteur d'effort
 - Couplemètre

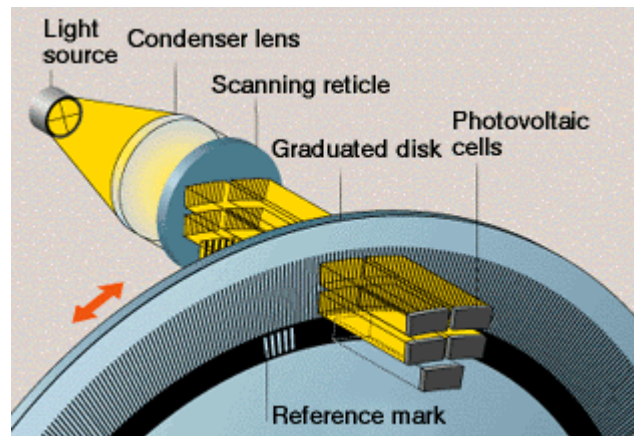
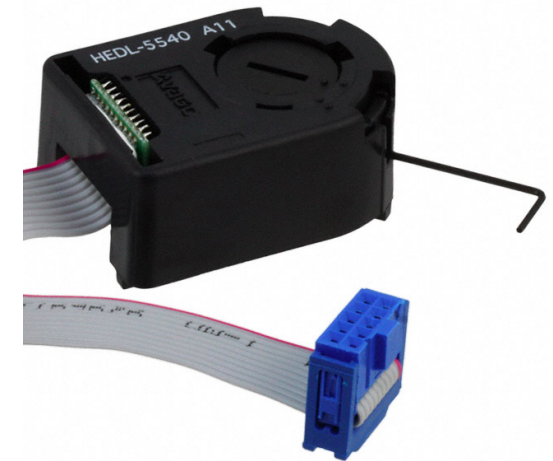


2. Commande articulaire

2.1.5 Les capteurs associés : capteurs de position

- **Codeur incrémental**

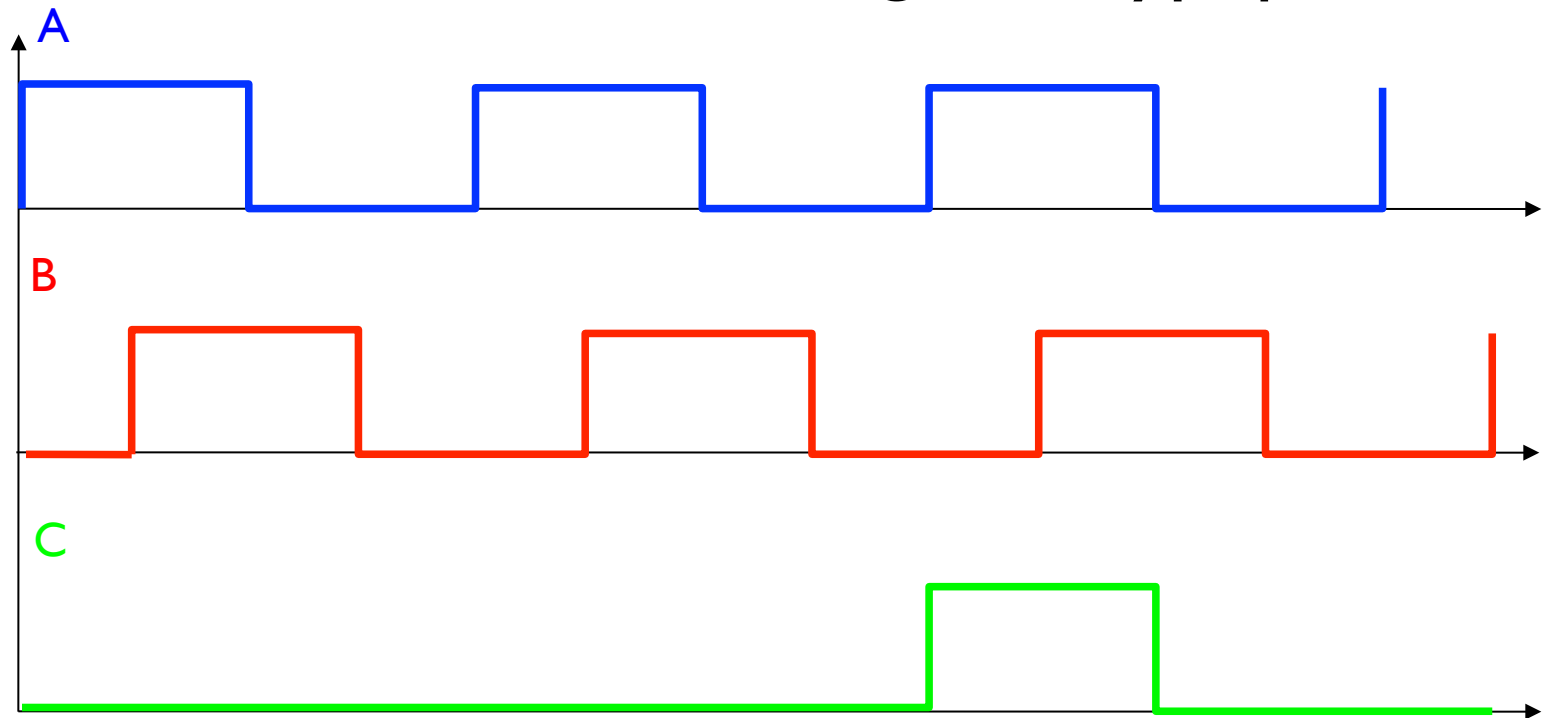
- Mesure optique
- Pas d'usure
- Immunité aux bruits EM
- Quantification de la mesure
- Initialisation nécessaire (*homing*)



2. Commande articulaire

2.1.5 Les capteurs associés : capteurs de position

- Codeur incrémental : signaux typiques



Comptage simple précision : on compte le nombre de périodes.

Comptage quadruple précision ; on compte les fronts (4 en une période).

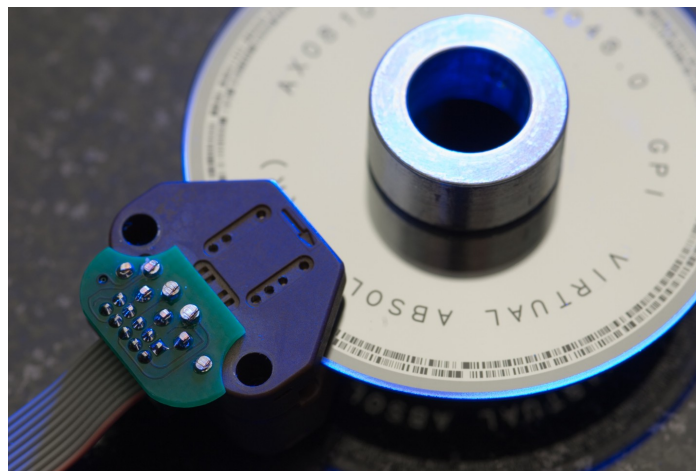
La voie C fournit une impulsion par tour.

2. Commande articulaire

2.1.5 Les capteurs associés : capteurs de position

- **Codeur absolu**

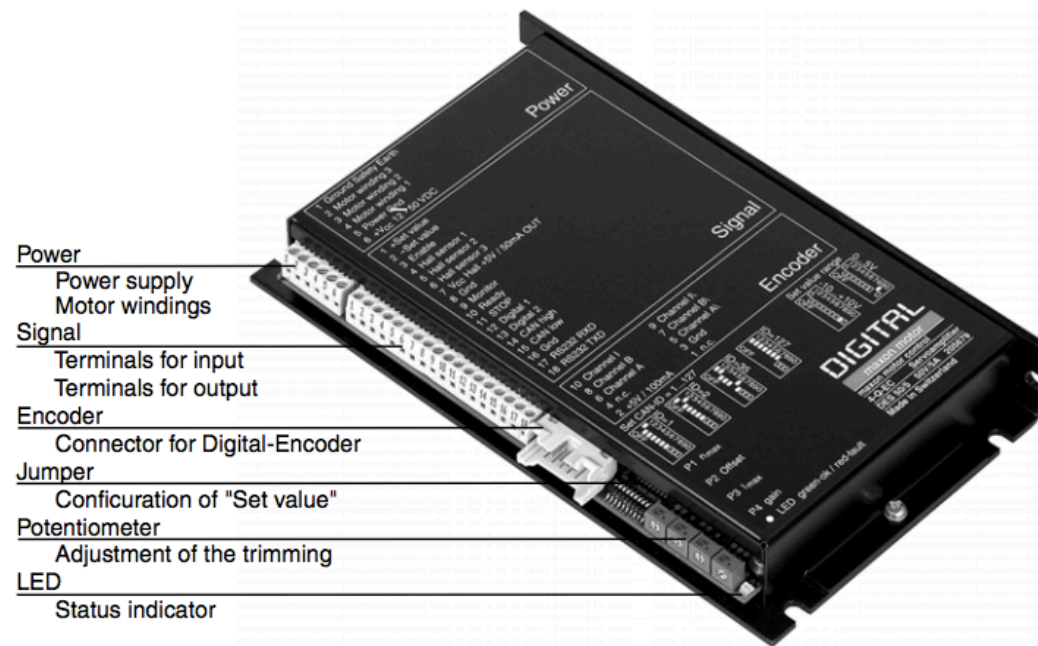
- Mesure absolue de position : pas d'initialisation
- Transmission série de l'information
- Mesure optique sans contact
- Résolution faible : utilisé conjointement avec mesure incrémentale.



2. Commande articulaire

2.2 Le variateur

- Principales fonctions :
 - Amplification
 - Régulation PI de courant
 - Régulation PI, PID, ou PIDFF de vitesse (optionnel)



2. Commande articulaire

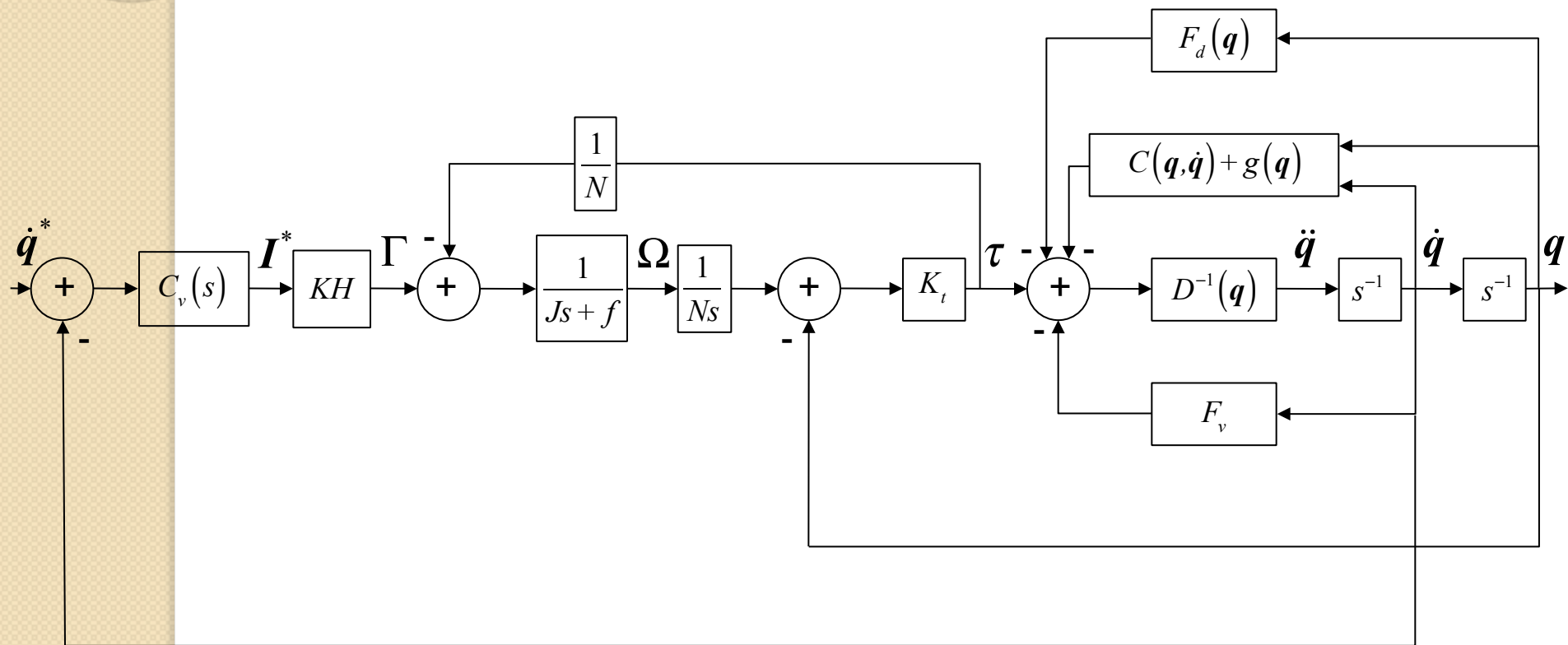
2.3 Commande de position articulaire

- Réalisée par l'ordinateur.
- Commande numérique.
- Fréquence $\geq 1000 \text{ Hz}$.
- Objectifs : performance et précision.
- Plusieurs niveaux de complexité :
 - Basique : PID axe par axe avec action FF.
 - Avancé : commande multivariables nonlinéaire.
Exemple : découplage nonlinéaire (*computed torque*).

2. Commande articulaire

2.3 Commande de position articulaire : c^{de} basique

- Schéma-bloc du robot :



2. Commande articulaire

2.3 Commande de position articulaire : c^{de} basique

- Avec :

- \mathbf{q} le vecteur des positions angulaires,
- $C_v(s)$ transmittance des correcteurs de vitesse,
- $H(s)$ transmittance des asservissements de courant,
- N rapport de réduction des réducteurs,
- K_t flexibilité des transmissions,
- $D(\mathbf{q})$ matrice d'inertie du robot,
- $C(\mathbf{q}, d\mathbf{q}/dt)$ matrices des effets centrifuges et Coriolis,
- $\mathbf{g}(\mathbf{q})$ vecteur des forces de gravité,
- F_v coefficient de frottements visqueux,
- $F_d(\mathbf{q})$ vecteur des frottements secs.

2. Commande articulaire

2.3 Commande de position articulaire : c^{de} basique

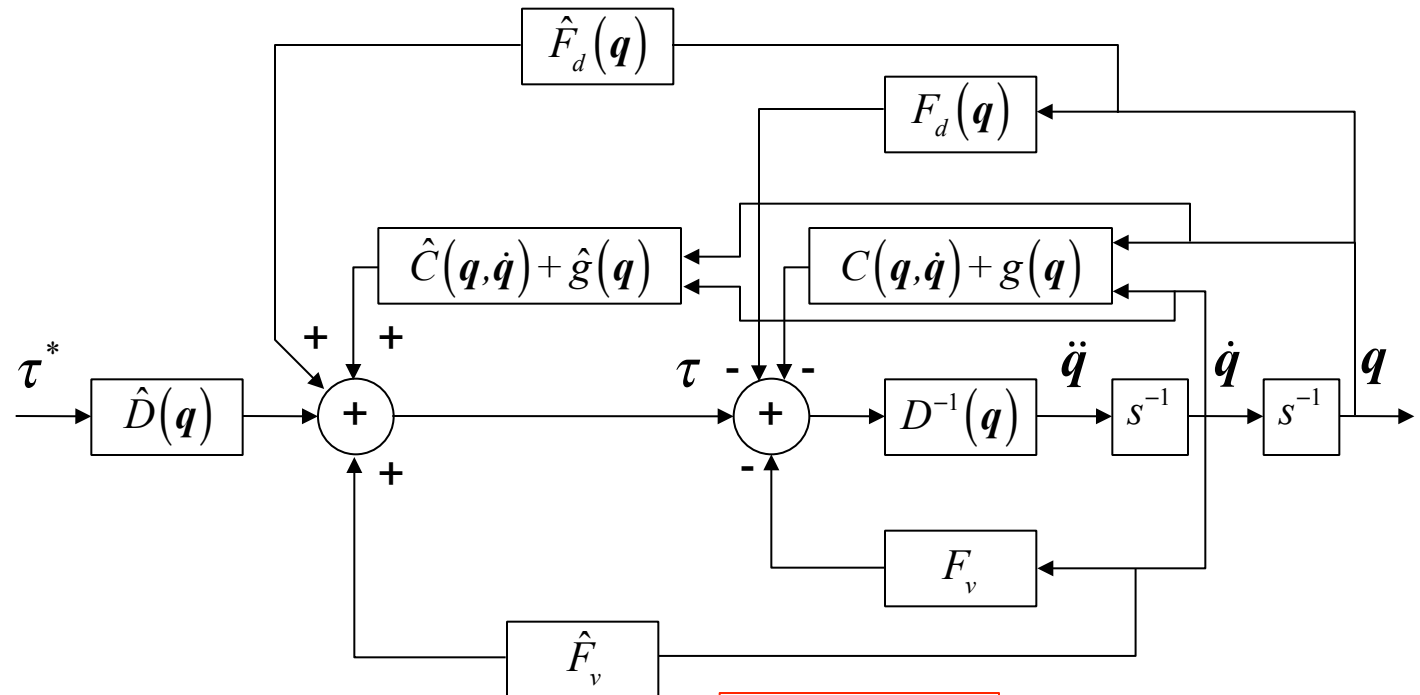
- **Approximations :**

- La plupart des effets nonlinéaires sont négligés (centrifuge, Coriolis, gravité, frottements secs) et sont modélisés par une perturbation $P(s)$.
- $D_d(\mathbf{q})$ est la matrice d'inertie diagonalisée en annulant les termes de couplage.
- Le modèle résultant est donc découplé. On peut l'asservir en position indépendamment axe par axe.
- Comme l'inertie varie avec \mathbf{q} , on peut avoir recours à une stratégie de séquençement de gain pour les correcteurs de position.

2. Commande articulaire

2.3 Commande de position articulaire : c^{de} avancée

- Découplage non linéaire :



- Modèle équivalent :

$$\frac{Q(s)}{T^*(s)} = \frac{1}{s^2}$$

2. Commande articulaire

2.4 Génération de trajectoire

- **Fonctions**

- Définir la consigne en fonction du temps pour les asservissements de positions.
- La trajectoire articulaire doit être lisse pour préserver la mécanique et éviter les saturations.
- Possibilité de choisir le type de courbe utilisée (polynôme, spline, ...).

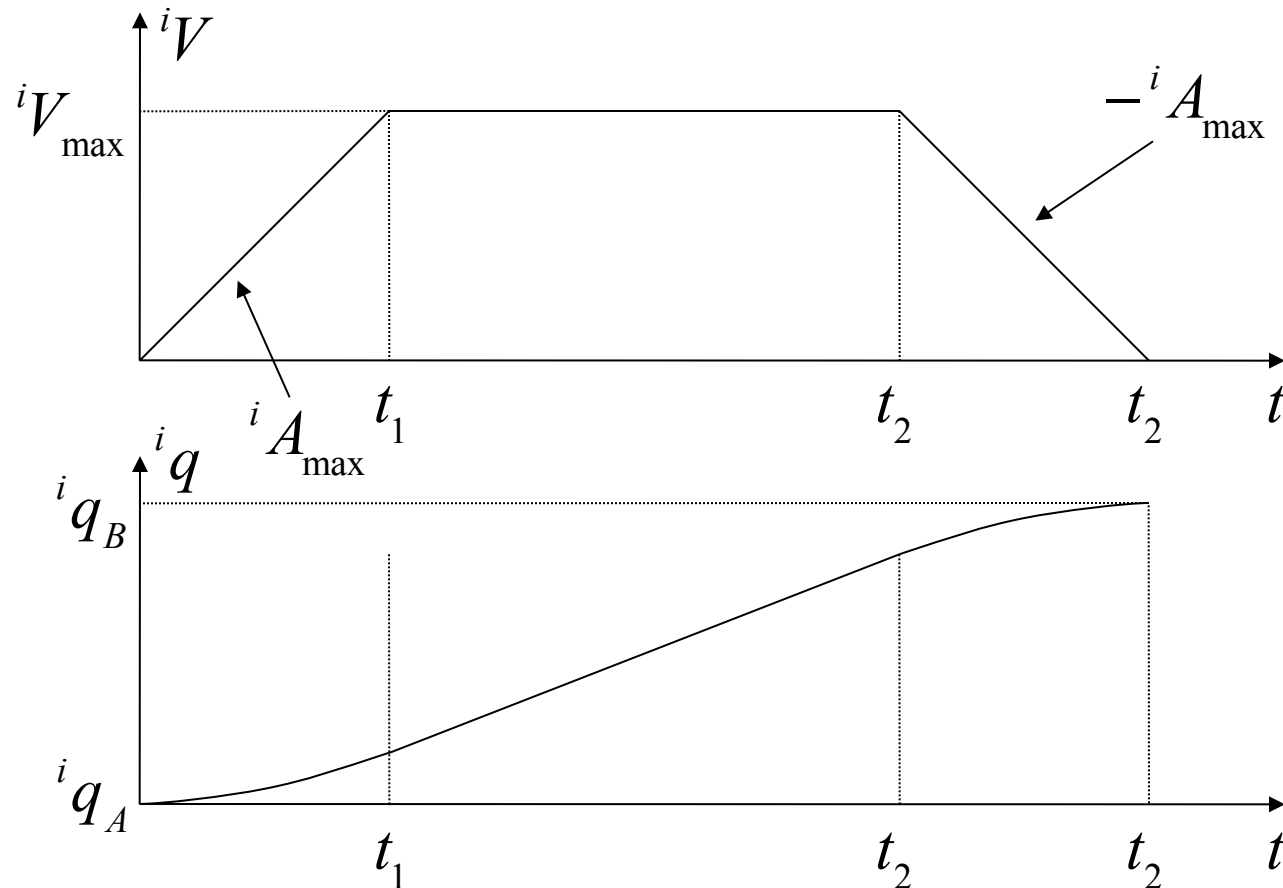
- **Objectif**

- A partir des positions à atteindre, vitesses et accélérations max des axes, générer les trajectoires articulaires pour que tous les axes partent et arrivent en même temps.

2. Commande articulaire

2.4 Génération de trajectoire : exemple

- Soit la trajectoire à générer :



2. Commande articulaire

2.4 Génération de trajectoire : exemple

- Avec :

- ${}^i A_{\max}$ Accélération maximale de l'axe i
- ${}^i V_{\max}$ Vitesse maximale de l'axe i
- ${}^i q_A$ Position initiale de l'axe i
- ${}^i q_B$ Position finale de l'axe i

- On peut démontrer que :

$$\left\{ \begin{array}{l} {}^i t_c = \frac{{}^i V_{\max}}{{}^i A_{\max}} + \frac{{}^i q_B - {}^i q_A}{{}^i V_{\max}} \quad \text{si } {}^i q_B - {}^i q_A > \frac{{}^i V_{\max}^2}{{}^i A_{\max}} \\ {}^i t_c = 2 \sqrt{\frac{{}^i q_B - {}^i q_A}{{}^i A_{\max}}} \quad \text{si } {}^i q_B - {}^i q_A \leq \frac{{}^i V_{\max}^2}{{}^i A_{\max}} \end{array} \right.$$

Avec ${}^i t_c$ le temps de cycle de l'axe i .

2. Commande articulaire

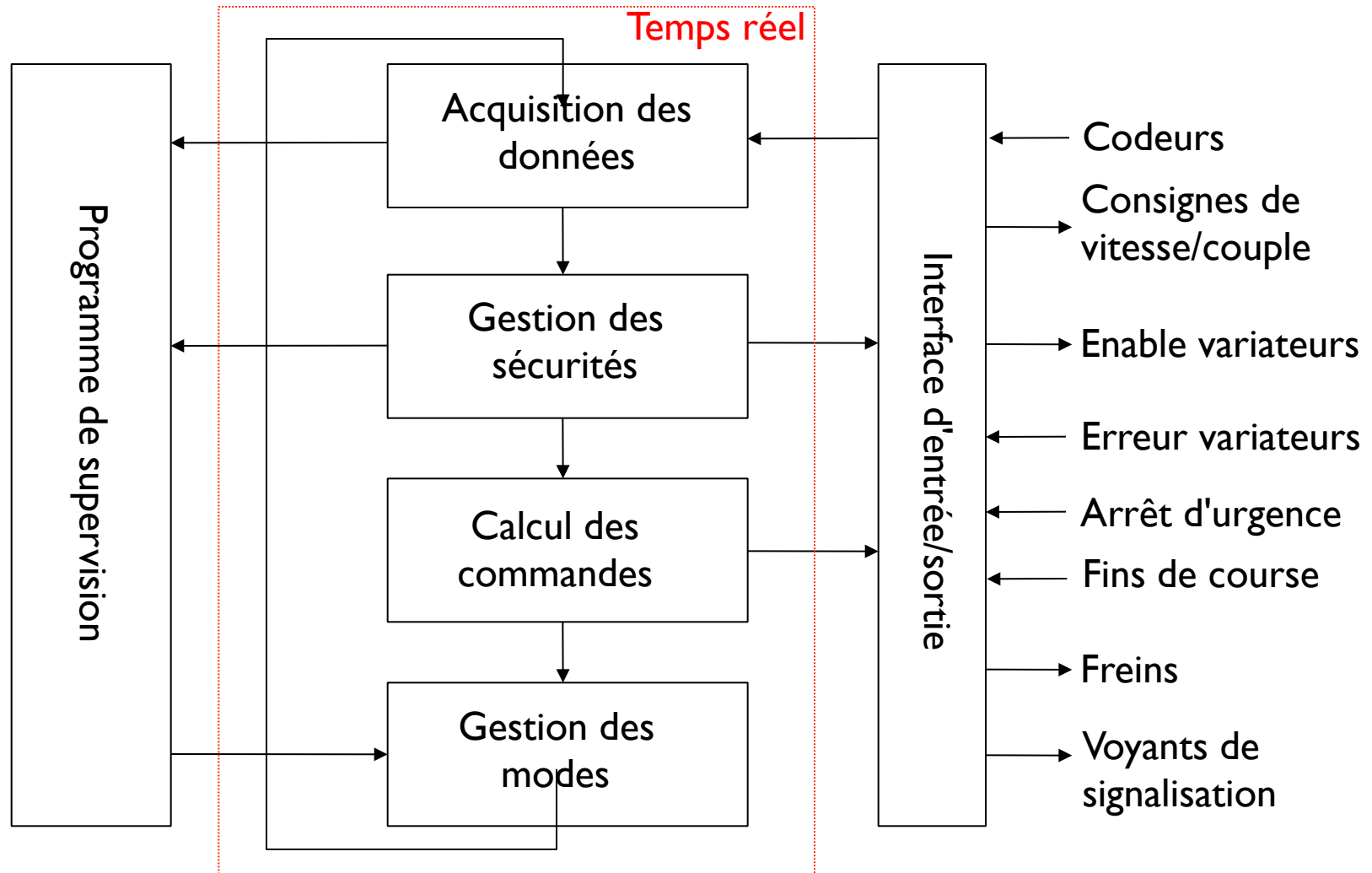
2.4 Génération de trajectoire : exemple

- Tous les axes ont un mouvement synchronisé :
 - Caler le temps de cycle de tous les axes sur le plus lent.
 - Soit $T_c = \max \{t_c\}$ le temps de cycle de l'axe le plus lent.
 - On recalcule l'accélération max ou la vitesse max de tous les autres axes :

$$\begin{cases} {}^i A = 4 \frac{{}^i q_B - {}^i q_A}{T_c^2} & \text{si } {}^i q_B - {}^i q_A \leq \frac{{}^i V_{\max}^2}{{}^i A_{\max}} \\ {}^i V = \frac{1}{2} \left[{}^i A_{\max} T_c - \sqrt{\left({}^i A_{\max} T_c \right)^2 - 4 \left({}^i q_B - {}^i q_A \right) {}^i A_{\max}} \right] & \text{sinon.} \end{cases}$$

3. Architecture logicielle

3.1 Architecture du contrôleur



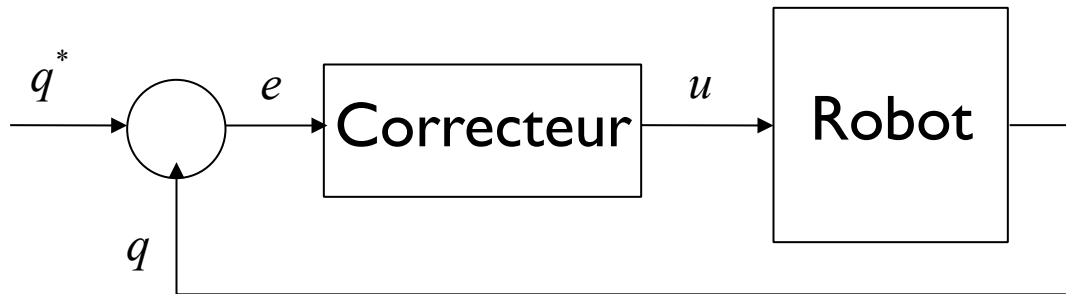
3. Architecture logicielle

3.2 Système d'exploitation

- **Système temps-réel « dur »**
 - Précision temporelle $< 50\mu s$
 - Synchronisation entre tâches
 - Hiérarchie de priorité des tâches
- **Exemples**
 - VxWorksTM
 - RTEMS
 - Xenomai

3. Architecture logicielle

3.3 Sécurités de haut niveau



- Erreur de traînage : si $|e| > \text{seuil}$
- Erreur de capteur : si $|u| > \text{seuil}$ et si q constant
- Erreur de collision : si $\left| \frac{d^2 q}{dt^2} \right| > \text{seuil}$

Quizz

- <https://goo.gl/xm5akV>

