

Commande des Systèmes Robotiques - 5AR01

Introduction et éléments technologiques

Support de cours réalisé en collaboration avec Wael BACHTA

Vincent PADOIS

`vincent.padois@upmc.fr`

Université Pierre et Marie Curie
Institut des Systèmes Intelligents et de Robotique (CNRS UMR 7222)



Rappel du plan

- 1 Organisation et contenu de l'UE
 - Fonctionnement et contrôle des connaissances
 - Contenu de l'UE
- 2 Introduction
 - Etymologie et définition
 - Types de robots
 - Applications de la robotique
 - Caractéristiques d'un robot manipulateur
 - Introduction à la problématique du contrôle
 - Elements technologiques principaux
- 3 Constitution d'un système robotique
 - Composition d'un axe de robot
 - Les actionneurs
 - Les transmissions
 - Les capteurs
 - Composition d'une armoire de commande
 - Les variateurs
 - Le contrôleur
- 4 Références

Rappel du plan

- 1 Organisation et contenu de l'UE
 - Fonctionnement et contrôle des connaissances
 - Contenu de l'UE
- 2 Introduction
 - Etymologie et définition
 - Types de robots
 - Applications de la robotique
 - Caractéristiques d'un robot manipulateur
 - Introduction à la problématique du contrôle
 - Elements technologiques principaux
- 3 Constitution d'un système robotique
 - Composition d'un axe de robot
 - Les actionneurs
 - Les transmissions
 - Les capteurs
 - Composition d'une armoire de commande
 - Les variateurs
 - Le contrôleur
- 4 Références

Fonctionnement et contrôle des connaissances

Bon à savoir

- Transparents de cours disponibles sur le site web de l'UE : <http://chronos.isir.upmc.fr/~padois/teaching/comrob> ;
- 4 cours de 4 heures / 1 TP Matlab de 4 heures / 2 TPs robot de 4 heures.
- Les cours commencent à l'heure. Tout(e) étudiant(e) arrivant en retard pourra se voir refuser l'accès à la salle de cours ou à la salle de TP. Pour vous aider, voici une heuristique de détermination de ce qu'est un retard acceptable : "On n'a pas le droit d'être plus en retard que le prof.". En outre, un célèbre professeur de Stanford (Bernard Roth) dirait quelque chose du genre "Vous êtes des adultes libres, faites des choix et assumez les."

Contrôle des connaissances

- Evaluation sur 100 points dont 60 points pour l'examen et 40 points pour le CC
- Contrôle continu :
 - Evaluation (en TP ou sur la base d'un compte-rendu) des TPs
 - Eventuels exercices à rendre et/ou interrogations surprises
- Examen final (en général de 4h00 sans documents mais ça pourrait changer).

Rappel du plan

- 1 Organisation et contenu de l'UE
 - Fonctionnement et contrôle des connaissances
 - Contenu de l'UE
- 2 Introduction
 - Etymologie et définition
 - Types de robots
 - Applications de la robotique
 - Caractéristiques d'un robot manipulateur
 - Introduction à la problématique du contrôle
 - Elements technologiques principaux
- 3 Constitution d'un système robotique
 - Composition d'un axe de robot
 - Les actionneurs
 - Les transmissions
 - Les capteurs
 - Composition d'une armoire de commande
 - Les variateurs
 - Le contrôleur
- 4 Références

Contenu de l'UE

Cours

- Introduction de la problématique de la commande en Robotique (C1)
- Modélisation et identification des systèmes Robotiques en vue de leur commande (C2)
- Techniques de commande articulaire "classiques" en Robotique (C3)
- Techniques de commande opérationnelle (C4)

TPs

- Identification paramétrique du modèle dynamique d'un système Robotique (sous Matlab, à partir de données expérimentales) (TP1)
- Contrôle décentralisé et réglage des correcteurs PID (avec un robot à deux DdL) (TP2)
- Contrôle avec découplage dynamique (avec un robot à deux DdL) (TP3)

Rappel du plan

- 1 Organisation et contenu de l'UE
 - Fonctionnement et contrôle des connaissances
 - Contenu de l'UE
- 2 Introduction
 - Etymologie et définition
 - Types de robots
 - Applications de la robotique
 - Caractéristiques d'un robot manipulateur
 - Introduction à la problématique du contrôle
 - Elements technologiques principaux
- 3 Constitution d'un système robotique
 - Composition d'un axe de robot
 - Les actionneurs
 - Les transmissions
 - Les capteurs
 - Composition d'une armoire de commande
 - Les variateurs
 - Le contrôleur
- 4 Références

Rappel du plan

- 1 Organisation et contenu de l'UE
 - Fonctionnement et contrôle des connaissances
 - Contenu de l'UE
- 2 **Introduction**
 - **Etymologie et définition**
 - Types de robots
 - Applications de la robotique
 - Caractéristiques d'un robot manipulateur
 - Introduction à la problématique du contrôle
 - Elements technologiques principaux
- 3 Constitution d'un système robotique
 - Composition d'un axe de robot
 - Les actionneurs
 - Les transmissions
 - Les capteurs
 - Composition d'une armoire de commande
 - Les variateurs
 - Le contrôleur
- 4 **Références**

Origine

Etymologie

- *robu* : "serviteur" en bulgare
- *rabota* : "Travail" en russe
- *Robota* : "Travail forcé" en tchèque
- Robot : terme utilisé pour la première fois en 1920 dans une pièce de théâtre de Karel Capek "Rossum's Universal Robots"
- Robotique : employé en 1942 par Isaac Asimov dans "Runaround" (les trois lois de la robotique)

Définition

Un système mécanique actionné dont le comportement est commandé par un ordinateur (re)programmable.

Rappel du plan

- 1 Organisation et contenu de l'UE
 - Fonctionnement et contrôle des connaissances
 - Contenu de l'UE
- 2 **Introduction**
 - Etymologie et définition
 - **Types de robots**
 - Applications de la robotique
 - Caractéristiques d'un robot manipulateur
 - Introduction à la problématique du contrôle
 - Elements technologiques principaux
- 3 Constitution d'un système robotique
 - Composition d'un axe de robot
 - Les actionneurs
 - Les transmissions
 - Les capteurs
 - Composition d'une armoire de commande
 - Les variateurs
 - Le contrôleur
- 4 Références

Types de robots (1)

Les robots mobiles



Robot à roues



Robot à pattes



Robot sous-marin



Robot volant



Robot bio-inspiré



Micro-robot volant

Types de robots (2)

Les robots humanoïdes



Robot humanoïde



Main robotique

Types de robots (3)

Les robots manipulateurs

Robots séries



Robot Kuka



Robot Fanuc



Robot Staubli



Robot ABB

Robots parallèles



Robot Adept



Robot ABB



Robot Fanuc

Rappel du plan

- 1 Organisation et contenu de l'UE
 - Fonctionnement et contrôle des connaissances
 - Contenu de l'UE
- 2 **Introduction**
 - Etymologie et définition
 - Types de robots
 - **Applications de la robotique**
 - Caractéristiques d'un robot manipulateur
 - Introduction à la problématique du contrôle
 - Elements technologiques principaux
- 3 Constitution d'un système robotique
 - Composition d'un axe de robot
 - Les actionneurs
 - Les transmissions
 - Les capteurs
 - Composition d'une armoire de commande
 - Les variateurs
 - Le contrôleur
- 4 Références

Applications de la robotique (1)

Applications industrielles : Soudage



Soudage à l'arc



Soudage par points

Applications de la robotique (2)

Applications industrielles : Palettisation



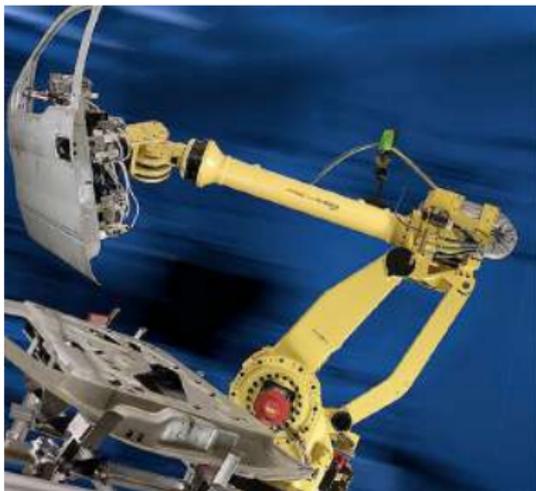
Applications de la robotique (3)

Applications industrielles : Peinture



Applications de la robotique (4)

Applications industrielles : Assemblage



Applications de la robotique (5)

Applications militaires



Robot mobile



Exosquelette

Applications de la robotique (6)

Applications médicales



Robot chirurgical (DaVinci)



Robot d'assistance

Rappel du plan

- 1 Organisation et contenu de l'UE
 - Fonctionnement et contrôle des connaissances
 - Contenu de l'UE
- 2 **Introduction**
 - Etymologie et définition
 - Types de robots
 - Applications de la robotique
 - **Caractéristiques d'un robot manipulateur**
 - Introduction à la problématique du contrôle
 - Elements technologiques principaux
- 3 Constitution d'un système robotique
 - Composition d'un axe de robot
 - Les actionneurs
 - Les transmissions
 - Les capteurs
 - Composition d'une armoire de commande
 - Les variateurs
 - Le contrôleur
- 4 Références

Caractéristiques d'un robot manipulateur

- **L'espace de travail** : Volume accessible par l'organe terminal du robot (cylindrique, sphérique)
- **La précision** : Le positionnement absolu d'un robot est imprécis ($> 1 \text{ mm}$) à cause des erreurs sur le modèle géométrique et des flexibilités
- **La répétabilité** : En général $< 0.1 \text{ mm}$, elle caractérise l'erreur maximale de positionnement répété de l'organe terminal dans tout l'espace de travail
- **Les performances dynamiques** :
 - vitesse maximale de chaque axe et les vitesses maximales de translation de l'organe terminal
 - accélération maximale pour chaque axe dans la configuration où l'inertie et la charge sont maximales
- **La charge maximale** : charge maximale que peut porter le robot : dépend des actionneurs
- **La charge utile** : charge maximale que peut porter le robot sans dégrader la répétabilité et les performances dynamiques

Rappel du plan

- 1 Organisation et contenu de l'UE
 - Fonctionnement et contrôle des connaissances
 - Contenu de l'UE
- 2 **Introduction**
 - Etymologie et définition
 - Types de robots
 - Applications de la robotique
 - Caractéristiques d'un robot manipulateur
 - **Introduction à la problématique du contrôle**
 - Elements technologiques principaux
- 3 Constitution d'un système robotique
 - Composition d'un axe de robot
 - Les actionneurs
 - Les transmissions
 - Les capteurs
 - Composition d'une armoire de commande
 - Les variateurs
 - Le contrôleur
- 4 Références

Introduction à la problématique du contrôle I

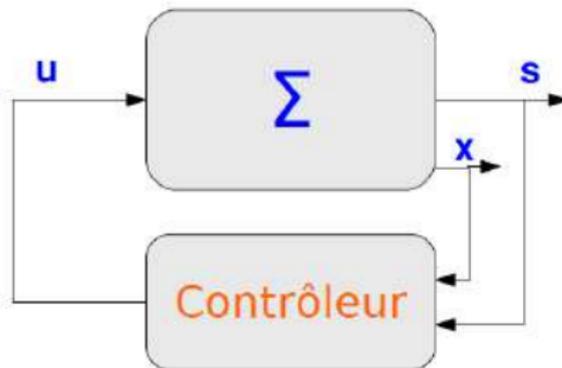
Etant donné un système Σ , déterminer l'évolution de ses entrées u afin de contrôler ses sorties (ou un sous-ensemble de ses sorties) s .



x est l'état du système.

Introduction à la problématique du contrôle II

Etant donné un système Σ , déterminer l'évolution de ses entrées \mathbf{u} afin de contrôler ses sorties (ou un sous-ensemble de ses sorties) \mathbf{s} .



\mathbf{x} est l'état du système.

Introduction à la problématique du contrôle III

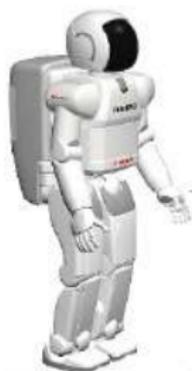
Classiquement, la conception du contrôleur nécessite la **modélisation** et l'**identification** du système.

Introduction à la problématique du contrôle IV

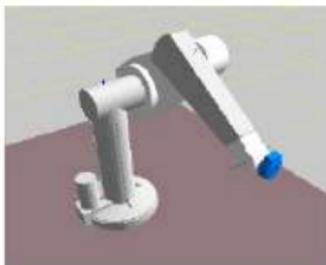
Classiquement, la conception du contrôleur nécessite la **modélisation** et l'**identification** du système.

Qu'ont ces systèmes en commun ?

Introduction à la problématique du contrôle V



©Honda Research



©Force Dimension

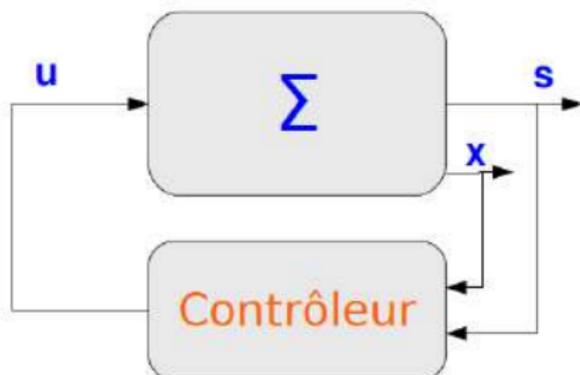


©Nasa JPL

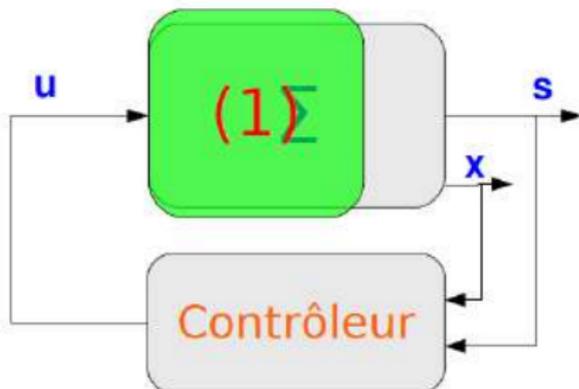
Rappel du plan

- 1 Organisation et contenu de l'UE
 - Fonctionnement et contrôle des connaissances
 - Contenu de l'UE
- 2 **Introduction**
 - Etymologie et définition
 - Types de robots
 - Applications de la robotique
 - Caractéristiques d'un robot manipulateur
 - Introduction à la problématique du contrôle
 - **Elements technologiques principaux**
- 3 Constitution d'un système robotique
 - Composition d'un axe de robot
 - Les actionneurs
 - Les transmissions
 - Les capteurs
 - Composition d'une armoire de commande
 - Les variateurs
 - Le contrôleur
- 4 Références

Elements technologiques principaux I

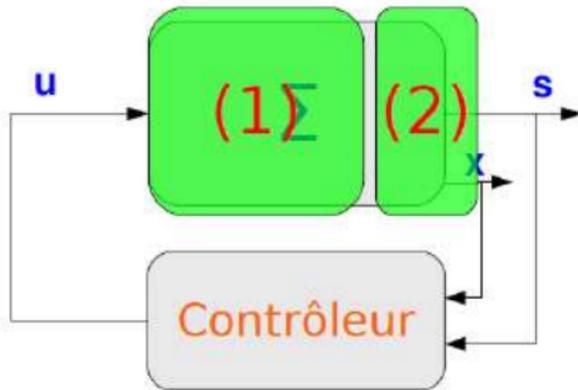


Elements technologiques principaux II



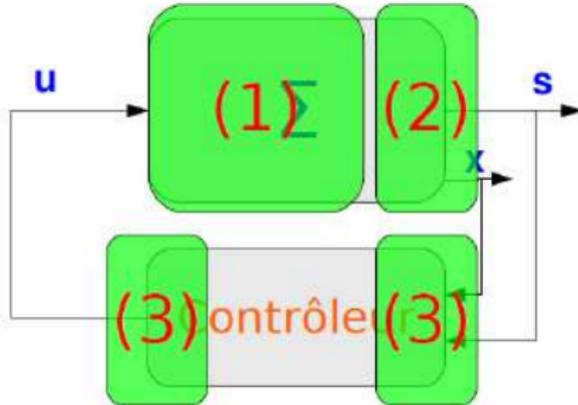
- ➊ **Actionneurs et transmissions** : conversion d'une énergie électrique, pneumatique ou hydraulique en une énergie mécanique cinétique ou potentielle.

Elements technologiques principaux III



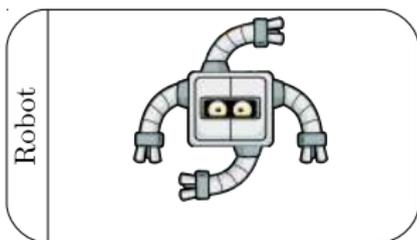
- 1 **Actionneurs et transmissions** : conversion d'une énergie électrique, pneumatique ou hydraulique en une énergie mécanique cinétique ou potentielle.
- 2 **Capteurs** : conversion de la valeur d'une grandeur physique en un signal mesurable (un signal électrique par exemple).

Elements technologiques principaux IV

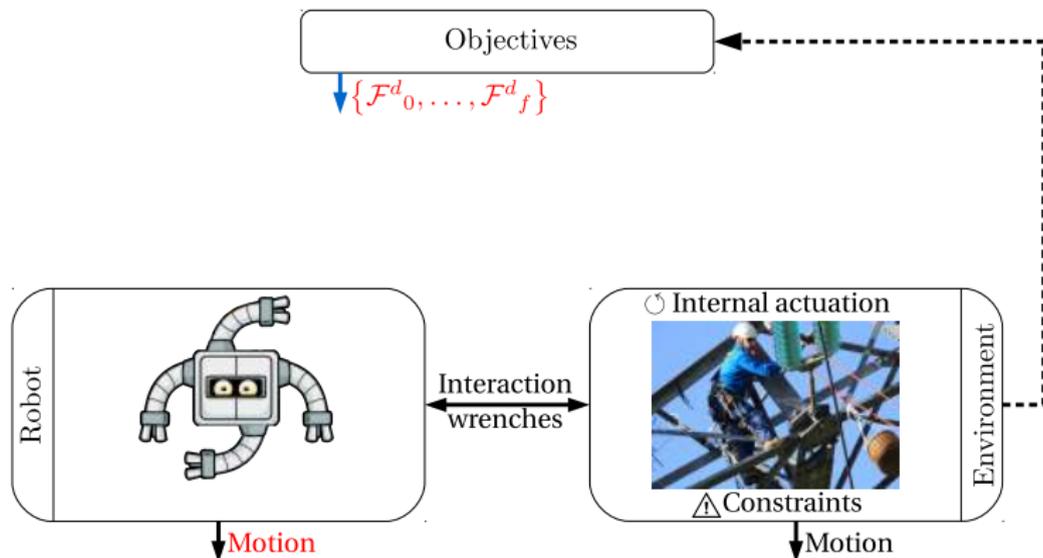


- ❶ **Actionneurs et transmissions** : conversion d'une énergie électrique, pneumatique ou hydraulique en une énergie mécanique cinétique ou potentielle.
- ❷ **Capteurs** : conversion de la valeur d'une grandeur physique en un signal mesurable (un signal électrique par exemple).
- ❸ **Interfaces** : conversion/amplification d'un signal électrique et/ou conversion analogique/numérique.

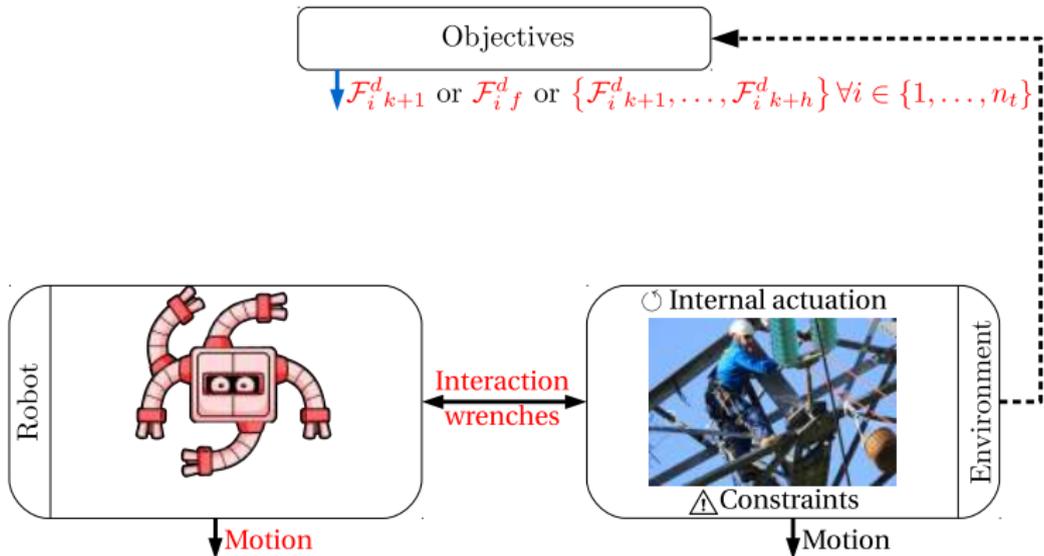
Nature des problèmes à résoudre



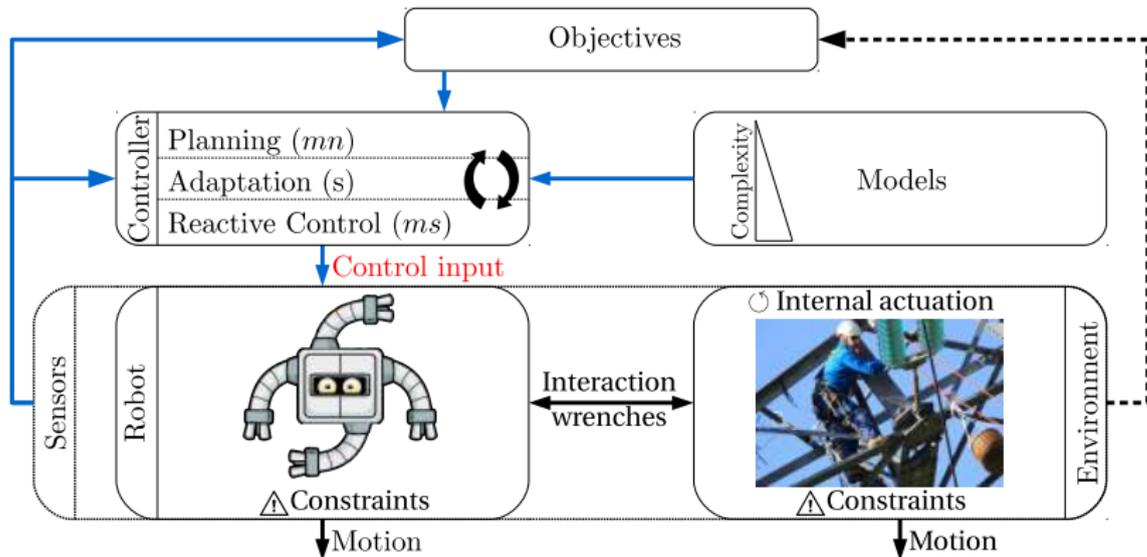
Nature des problèmes à résoudre



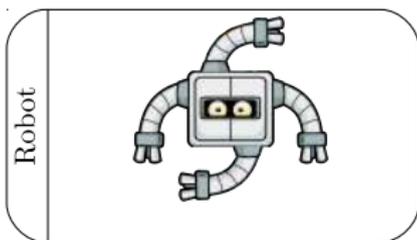
Nature des problèmes à résoudre



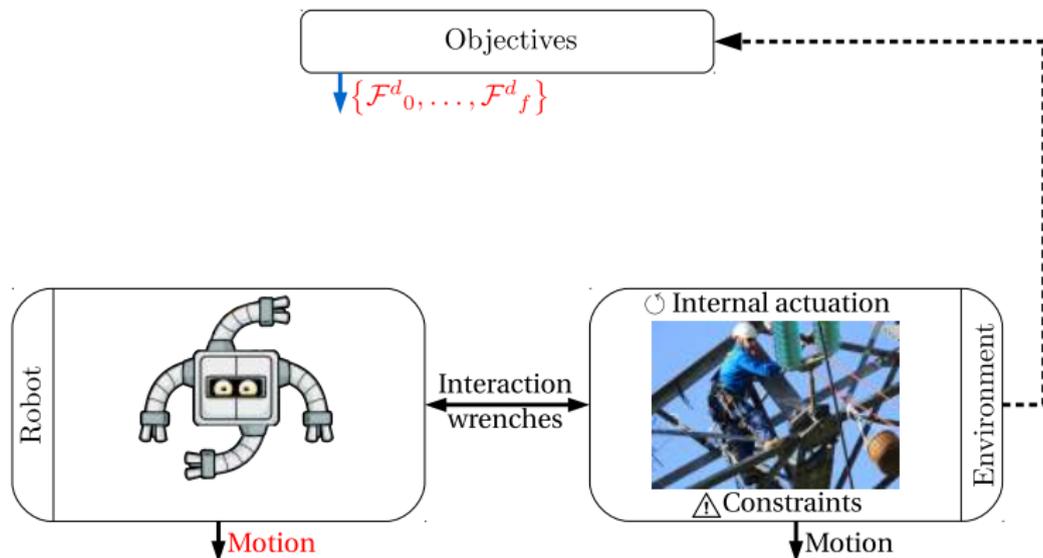
Nature des problèmes à résoudre



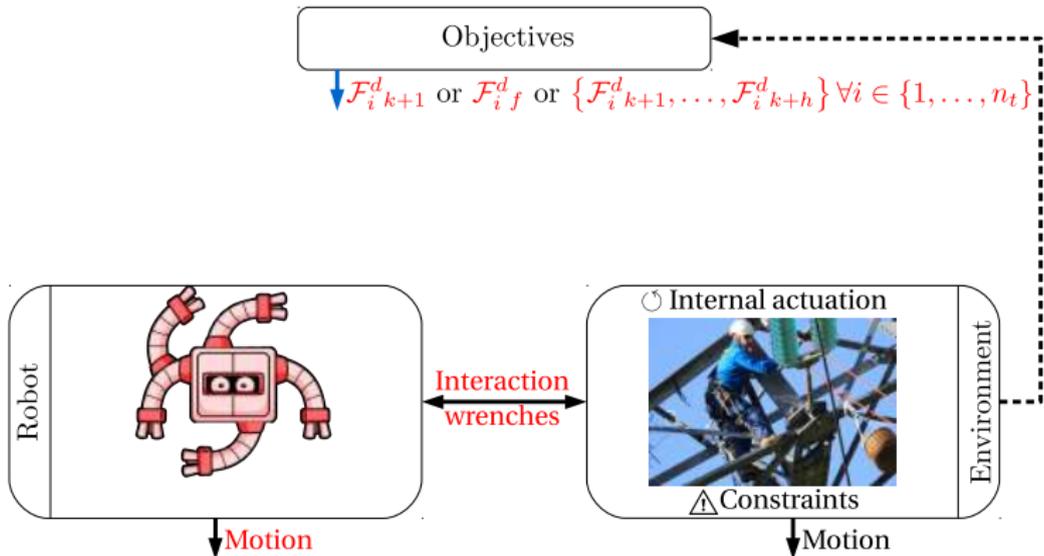
Nature des problèmes à résoudre



Nature des problèmes à résoudre



Nature des problèmes à résoudre



Nature des problèmes à résoudre : typologie rapide I

Les méthodes de commande possiblement mises en œuvre dépendent de la nature du problème à résoudre. De manière très macroscopique, en se cantonnant au cas où l'objectif du robot se traduit en terme de mouvement de l'organe terminal, 4 cas peuvent être distingués :

- **But final connu et environnement statique (cas industriel typique)** : la planification hors ligne des trajectoires articulaires peut être réalisée. Le problème de commande résolu en ligne consiste au suivi de ces trajectoires. Si l'environnement est connu (modèle CAO par exemple) et que la pose relative de la base du robot est connue dans cet environnement : pas de besoin en terme de capteurs extéroceptifs.
- **But final inconnu et environnement statique (téléopération,...)** : la consigne opérationnelle est découverte à chaque instant et le problème ne peut être résolu que réactivement avec éventuellement l'emploi de techniques de commande prédictive permettant plus de robustesse et d'optimalité des décisions de commande prises. Si l'environnement est connu (modèle CAO par exemple) et que la pose relative de la base du robot est connue dans cet environnement : pas de besoin en terme de capteurs extéroceptifs.

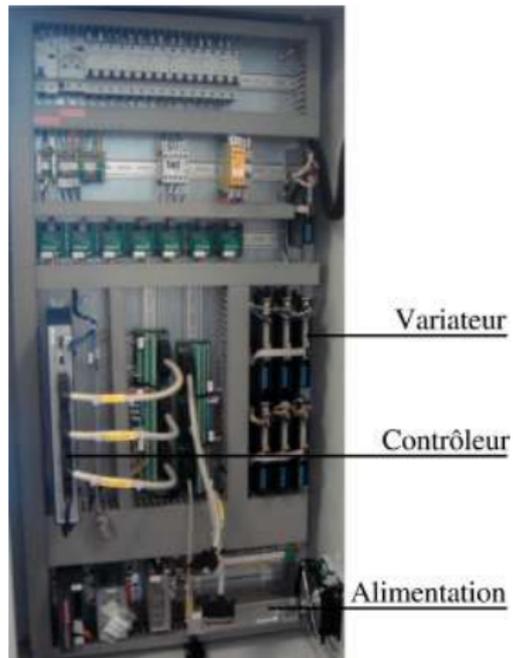
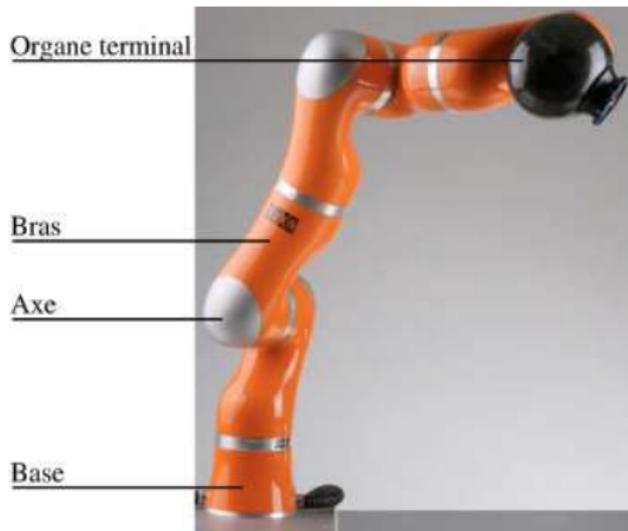
Nature des problèmes à résoudre : typologie rapide II

- **But final connu et environnement dynamique (robot mobile dans un entrepôt,...)** : une planification hors-ligne de la trajectoire idéale tenant compte des éléments de l'environnement considérés comme statique est possible. Au moment de l'exécution une adaptation en ligne et une éventuelle replanification en ligne de la trajectoire à suivre sont nécessaires. En outre, des moyens de perception des éléments mobiles de l'environnement sont nécessaires ainsi que, pour un robot mobile, un système d'odométrie ou de manière plus générale d'estimation de la pose relative du robot relativement à l'environnement.
- **But final inconnu et environnement dynamique (robot mobile en mode desserte intelligente suivant un opérateur,...)** : la consigne opérationnelle est découverte à chaque instant et le problème ne peut être résolu que réactivement avec éventuellement l'emploi de techniques de commande prédictive permettant plus de robustesse et d'optimalité des décisions de commande prises. En outre, des moyens de perception des éléments mobiles de l'environnement sont nécessaires ainsi que, pour un robot mobile, un système d'odométrie ou de manière plus générale d'estimation de la pose relative du robot relativement à l'environnement.

Rappel du plan

- 1 Organisation et contenu de l'UE
 - Fonctionnement et contrôle des connaissances
 - Contenu de l'UE
- 2 Introduction
 - Etymologie et définition
 - Types de robots
 - Applications de la robotique
 - Caractéristiques d'un robot manipulateur
 - Introduction à la problématique du contrôle
 - Elements technologiques principaux
- 3 **Constitution d'un système robotique**
 - **Composition d'un axe de robot**
 - Les actionneurs
 - Les transmissions
 - Les capteurs
 - **Composition d'une armoire de commande**
 - Les variateurs
 - Le contrôleur
- 4 **Références**

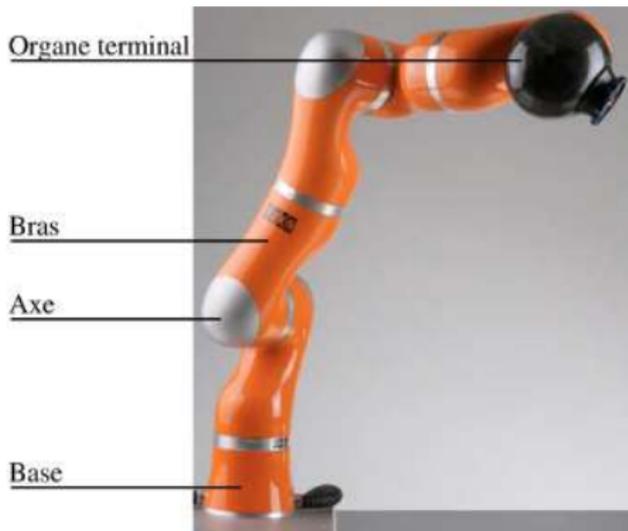
Constitution d'un système robotique



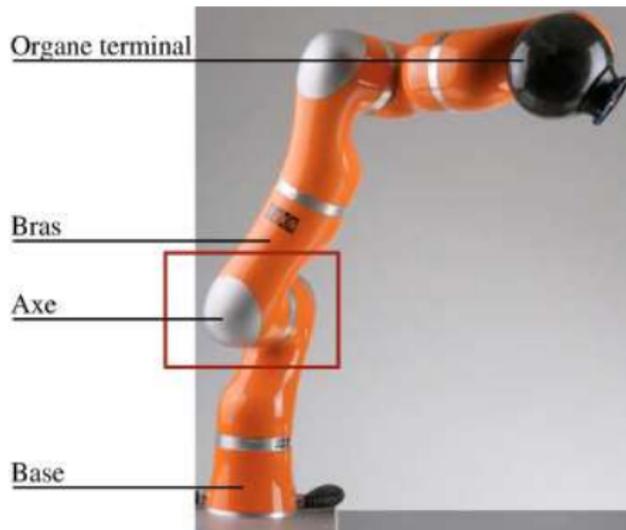
Rappel du plan

- 1 Organisation et contenu de l'UE
 - Fonctionnement et contrôle des connaissances
 - Contenu de l'UE
- 2 Introduction
 - Etymologie et définition
 - Types de robots
 - Applications de la robotique
 - Caractéristiques d'un robot manipulateur
 - Introduction à la problématique du contrôle
 - Elements technologiques principaux
- 3 **Constitution d'un système robotique**
 - **Composition d'un axe de robot**
 - Les actionneurs
 - Les transmissions
 - Les capteurs
 - Composition d'une armoire de commande
 - Les variateurs
 - Le contrôleur
- 4 Références

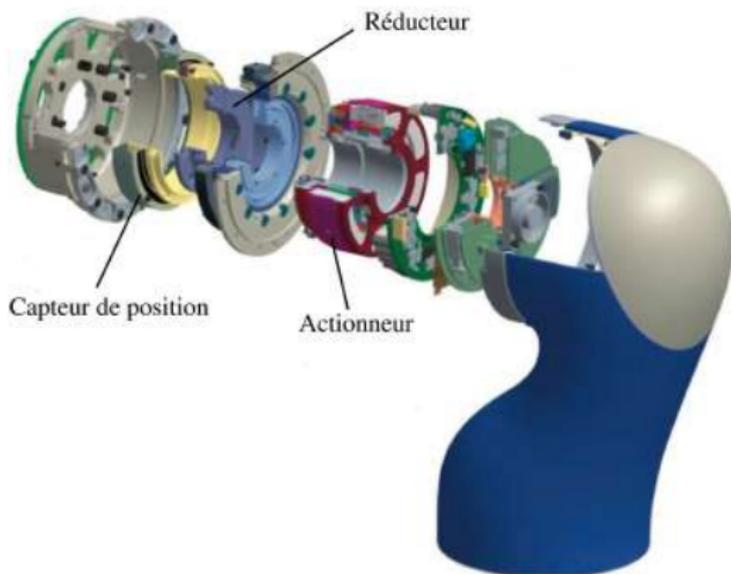
Composition d'un axe de robot



Composition d'un axe de robot

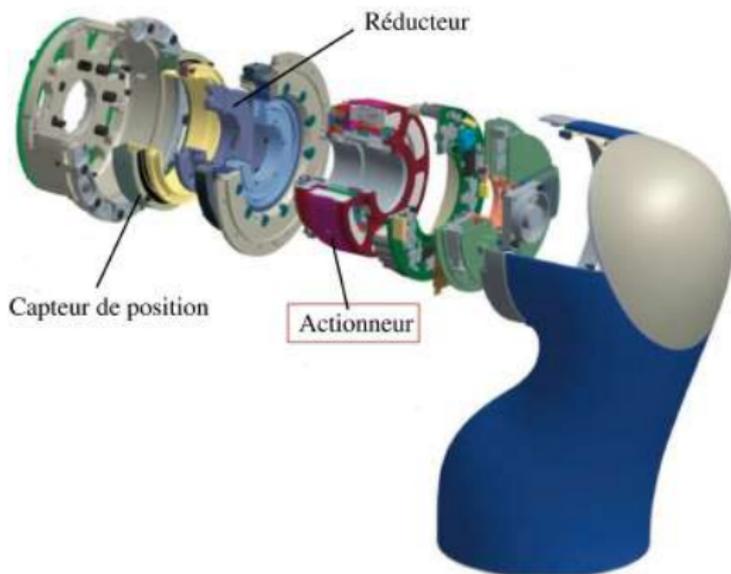


Composition d'un axe de robot



Vue éclatée d'un axe

Les actionneurs en robotique (1)



Vue éclatée d'un axe

Les actionneurs en robotique (2)

Les actionneurs utilisés en robotique sont généralement :

- hydrauliques
- pneumatiques
- électriques



Vérin hydraulique



Vérin pneumatique



Moteur électrique

Les actionneurs en robotique (2)

Les actionneurs utilisés en robotique sont généralement :

- hydrauliques
- pneumatiques
- **électriques**

Les plus souvent utilisés en robotique



Vérin hydraulique



Vérin pneumatique



Moteur électrique

Brièvement : Moteurs à CC et synchrones

Avantages

- Principe (et donc modèle) simple, historique en robotique ;
- Contrôle du couple (boucle de courant) ou contrôle de la vitesse (boucle de tension) ;
- Contrôle précis ;
- Bande passante élevée (bon comportement dynamique).

Inconvénients

- Mauvais rapport poids/puissance ;
- Vitesse importante, couple faible : nécessite des rapports de réduction élevés.

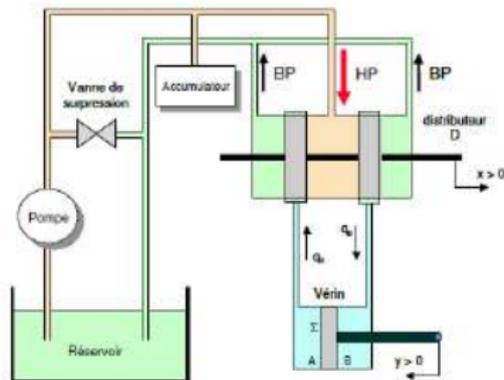
Spécificités des moteurs Brushless

- Meilleur rapport poids/puissance ;
- Moins d'usure (pas de balais) ;
- Electronique de contrôle plus complexe.

Brièvement : Actionneurs hydrauliques

Avantages

- Très bon rapport poids/puissance : charge utile élevée ;
- Pas de transmission ;
- Contrôle en couple (boucle de pression) ou contrôle en vitesse (boucle de débit).



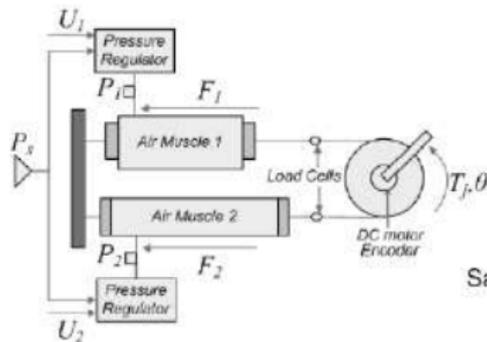
Inconvénients

- Bande passante faible (mauvais comportement dynamique) ;
- Fortement non linéaires : modèles complexes.

Brièvement : Actionneurs pneumatiques

Avantages

- Très bon rapport poids/puissance : charge utile élevée, légers,
- Naturellement compressible (compliant) : sécurité ;
- Contrôle du couple (boucle de pression).



Sardellitti et al., IROS 07

Inconvénients

- Bande passante faible (mauvais comportement dynamique) ;
- Fortement non linéaires : modèles complexes.

Les actionneurs électriques

Deux types d'actionneurs électriques :

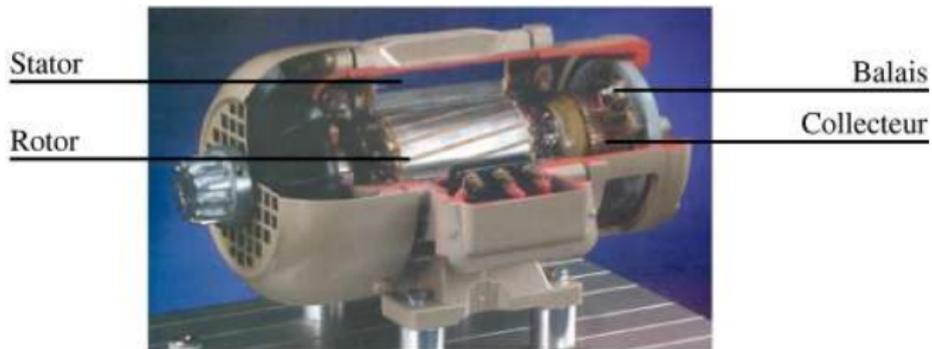
Machine à courant continu

- Un champ magnétique permanent est créé au stator grâce à un aimant permanent
- Un courant continu est amené dans le bobinage du rotor grâce à un système de "balais-collecteur". Le courant continu crée un champ magnétique en quadrature avec le champ du stator ce qui génère un couple proportionnel au courant

Machine synchrone (brushless)

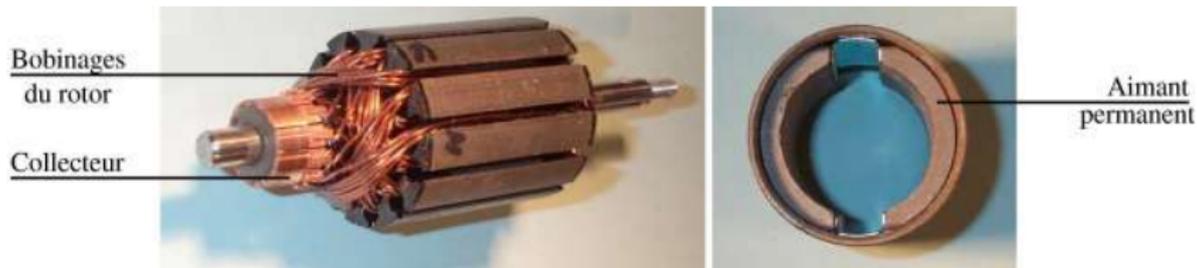
- Un champ magnétique permanent est créé au rotor grâce à un aimant permanent
- Le stator est généralement composé de 3 bobinages. Ces bobinages sont parcourus par un courant triphasé de fréquence variable. La phase du courant est telle qu'un champ est créé en quadrature avec celui du rotor. Le courant est commandé en fonction de la position du rotor pour toujours garantir la quadrature des champs.

La machine à courant continu : Vue d'ensemble



Machine à courant continu

La machine à courant continu : Éléments constitutifs



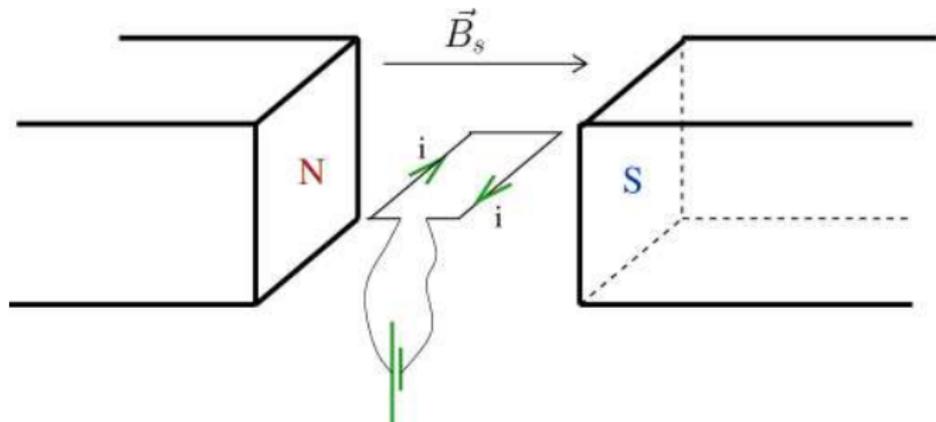
Le rotor

Le stator



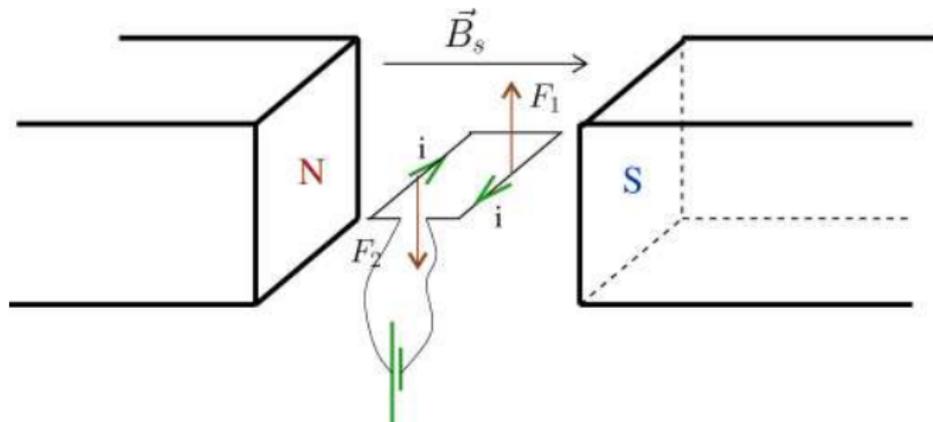
Système balais-collecteur

La machine à courant continu : Principe de fonctionnement



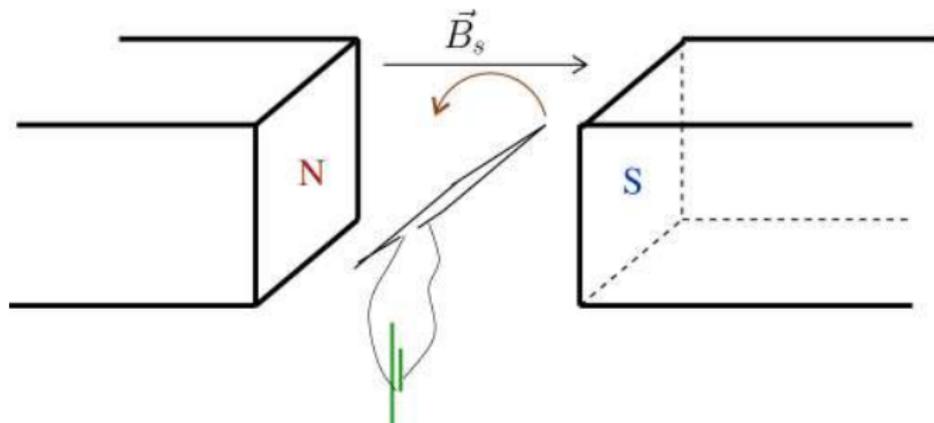
Force de Laplace : $\vec{F} = \vec{i} \wedge \vec{B}_s$

La machine à courant continu : Principe de fonctionnement



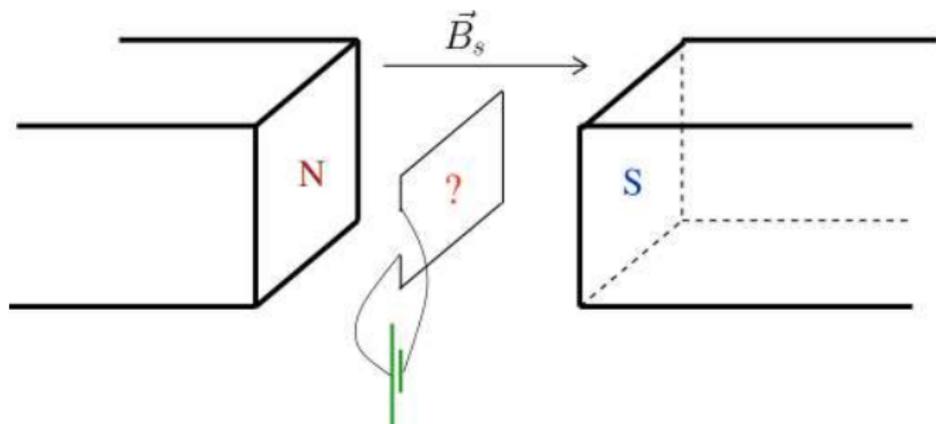
Force de Laplace : $\vec{F} = \vec{i} \wedge \vec{B}_s$

La machine à courant continu : Principe de fonctionnement



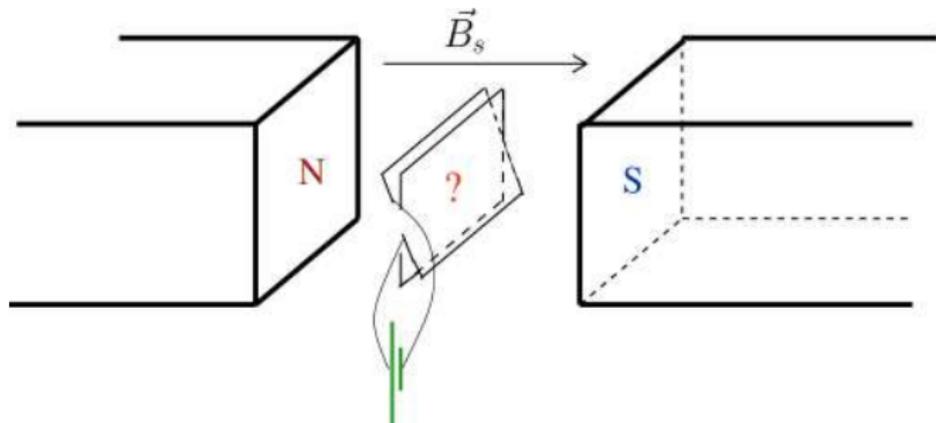
Force de Laplace : $\vec{F} = \vec{i} \wedge \vec{B}_s$: Rotation

La machine à courant continu : Principe de fonctionnement



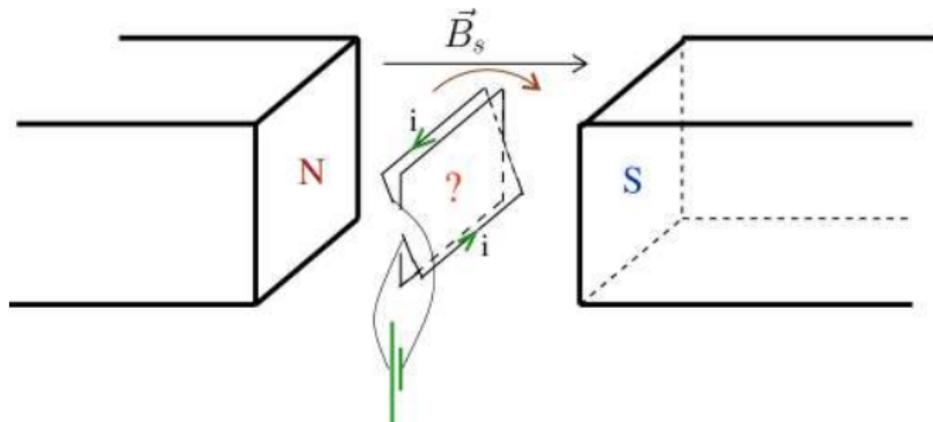
Le couple est nul

La machine à courant continu : Principe de fonctionnement



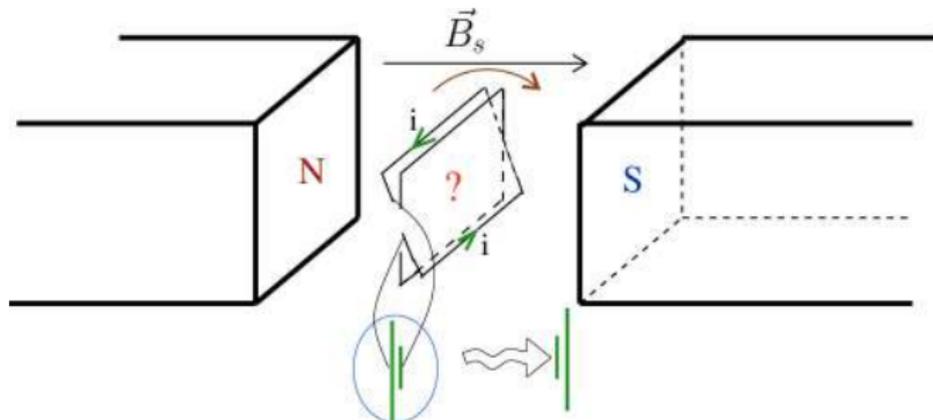
L'énergie cinétique provoque quand même une rotation

La machine à courant continu : Principe de fonctionnement



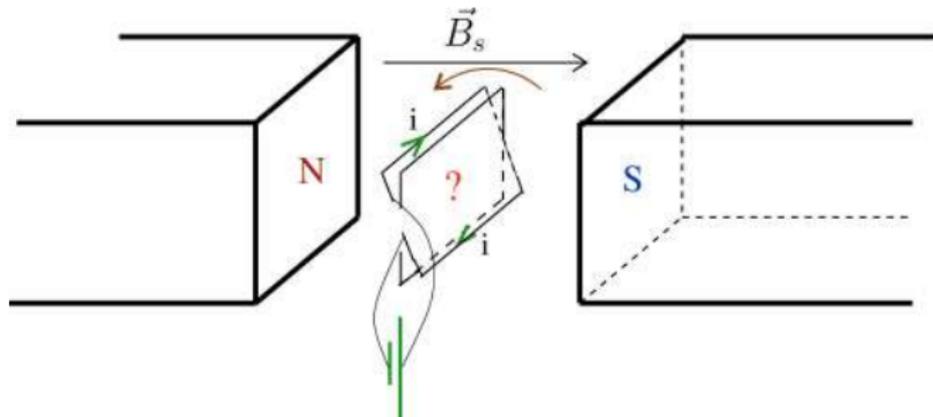
Problème : Le couple est inversé \Rightarrow Rotation dans le sens inverse

La machine à courant continu : Principe de fonctionnement



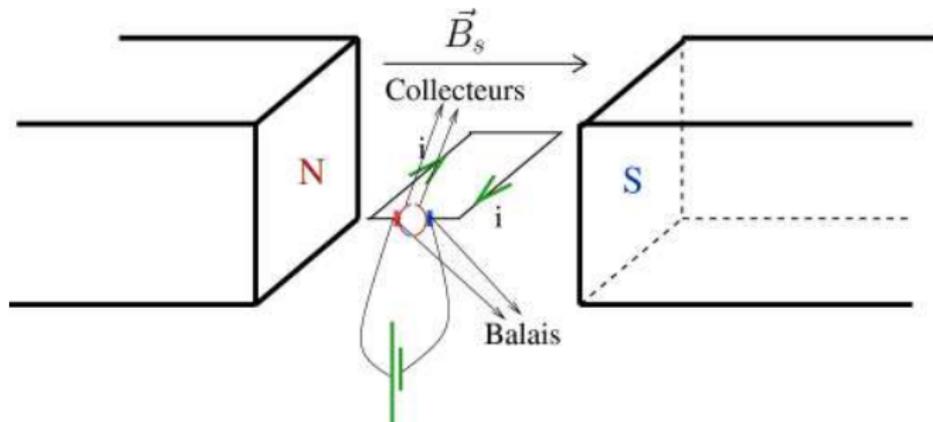
Solution : Inverser l'alimentation

La machine à courant continu : Principe de fonctionnement



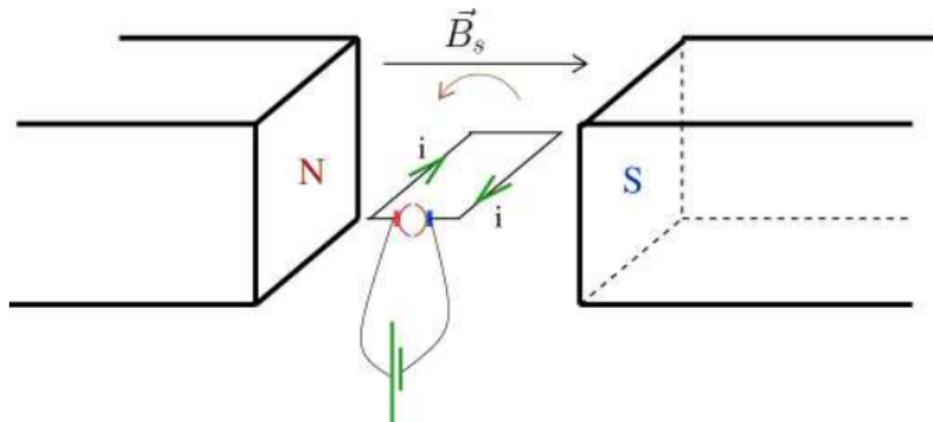
Solution : Inverser l'alimentation \Rightarrow **C'est le rôle du système balais-collecteur**

La machine à courant continu : Principe de fonctionnement



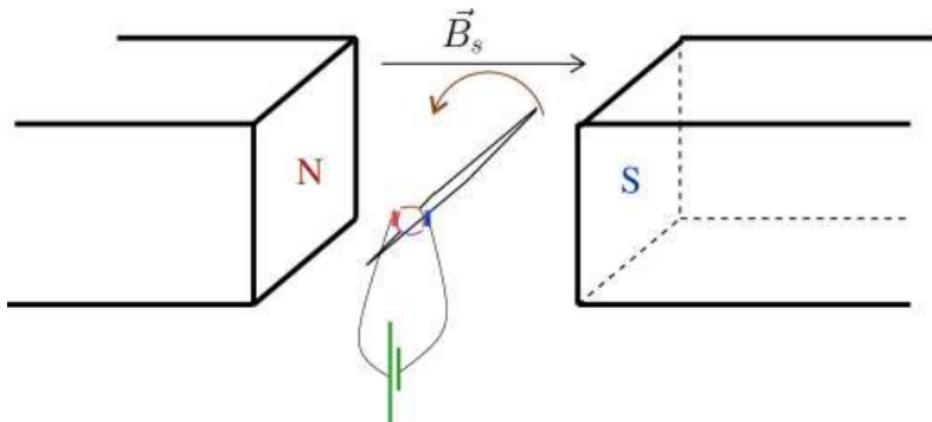
Les collecteurs et la spire sont en quadrature

La machine à courant continu : Principe de fonctionnement



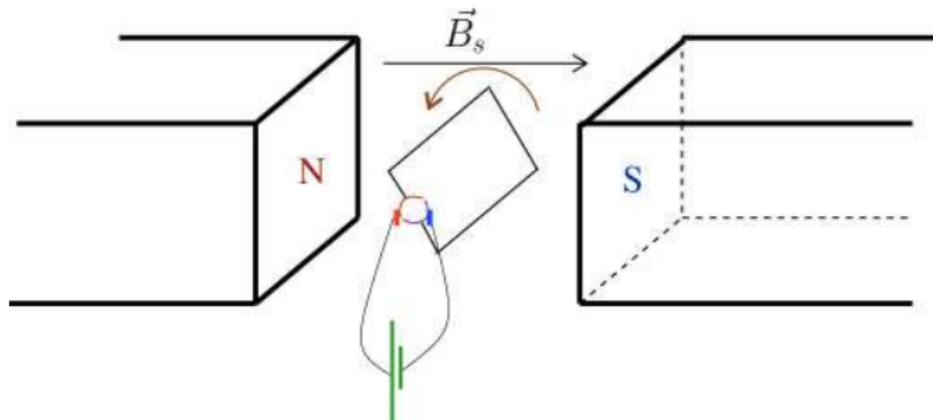
Les collecteurs et la spire sont en quadrature

La machine à courant continu : Principe de fonctionnement



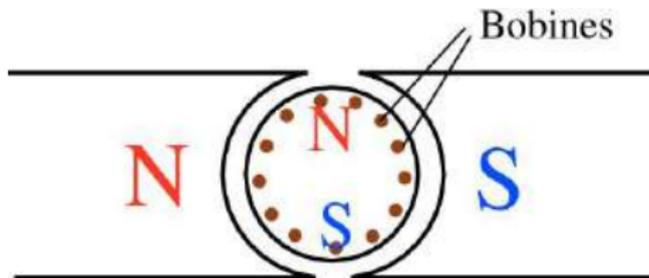
Les collecteurs glissent sur les balais fixes

La machine à courant continu : Principe de fonctionnement



Commutation de l'alimentation

La machine à courant continu (mcc) : résumé



Pour obtenir un couple suffisant :

- Plusieurs spires : des bobines
- Champ du rotor toujours en quadrature de phase par rapport à celui du stator

La machine synchrone : Éléments constitutifs



Machine synchrone



Bobine

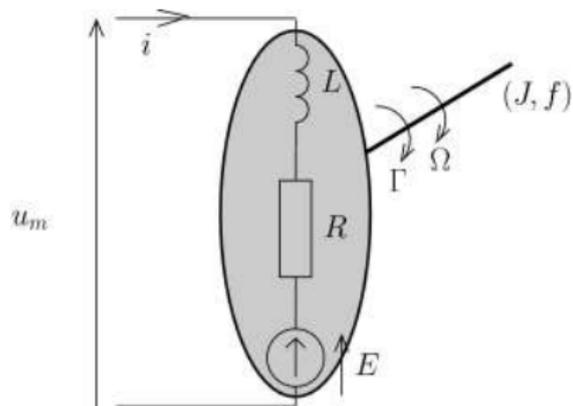
Le stator



Aimant permanent

Le rotor

Modélisation de la mcc (1)

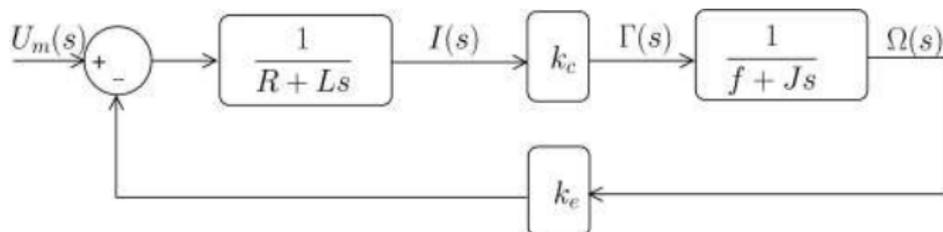


- Grandeurs électriques :
 - R : Résistance de l'induit
 - L : Inductance de l'induit
 - E : Force contre-électromotrice
 - u_m : Tension au bornes du moteur

- Grandeurs mécaniques :
 - J : Inertie du rotor
 - f : Frottements visqueux
 - Γ : Couple moteur
 - Ω : Vitesse du rotor

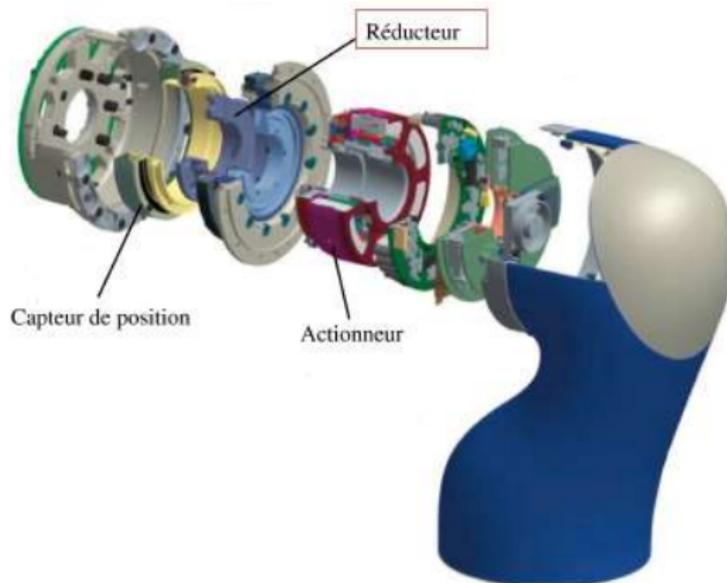
Modélisation de la mcc (2)

- **Le couple moteur** : $\Gamma = k_c i$ (k_c : constante de couple)
- **La force contre-électromotrice** : $E = k_e \Omega$ (k_e : constante)
- **L'équation électrique** : $u_m = E + Ri + L \frac{di}{dt}$
- **L'équation mécanique** : $J \frac{\Omega}{dt} + f\Omega = \Gamma$



Modèle également valable pour une machine synchrone

Les transmissions



Vue éclatée d'un axe

Les transmissions : rôle et modélisation

Les transmissions

- Un actionneur tourne à grande vitesse et fournit un couple faible comparé aux couples nécessaires pour déplacer un robot \Rightarrow on connecte les moteurs au corps du robot à travers un organe de transmission : le réducteur
- Le rôle du réducteur est d'amplifier le couple moteur

Modélisation

Soient :

- q_m et Γ_m respectivement la position angulaire et le couple à la sortie du moteur
- q_s et Γ_s la position angulaire et le couple à la sortie du réducteur
- $N > 1$ l'inverse du rapport de réduction

nous avons : $\dot{q}_s = \frac{1}{N} \dot{q}_m, \quad \Gamma_s = N \Gamma_m$

Hypothèse : Pas de dissipation d'énergie !

Pignons et courroies



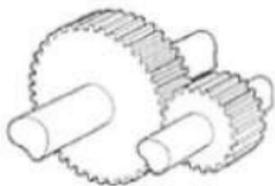
Avantages

Simplicité, peu de jeu, bonne réversibilité, miniaturisation, déport de l'actionneur

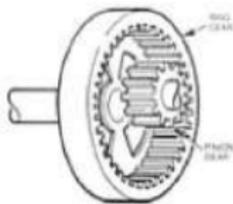
Inconvénients

N petit, élasticité

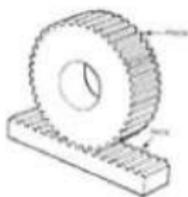
Engrenages (1)



externe

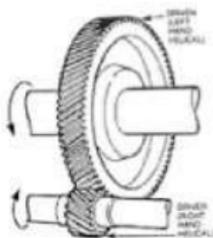


interne



pignon/crémaillère

Engrenages cylindriques droits



arbres parallèles



arbres perpendiculaires

Engrenages hélicoïdaux

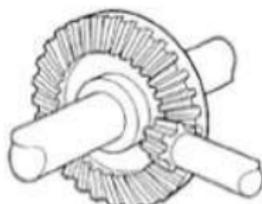
Avantages

chaînage et montage simples, très couramment utilisés.

Inconvénients

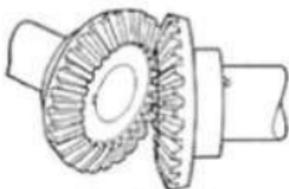
compromis difficile entre jeu et pertes d'énergie par frottements, mauvaise réversibilité, encombrement (donc poids), peu de dents en contact en même temps (limite la charge)

Engrenages(2)



Straight Cut Bevel

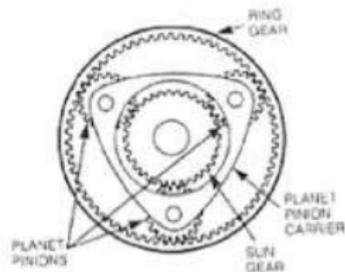
angle droit



Angular Bevel

angle quelconque

Engrenages coniques



Trains planétaires ou épicycloïdes

Avantages

compacité, coaxialité, grand rapport de réduction

Inconvénients

fabrication complexe, frottements élevés (ou jeu important), très mauvaise réversibilité

Harmonic Drive (1)



Circular spline

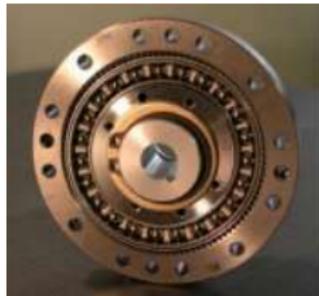
Flexspline

Wave Generator

Principe

- Strain wave gearing theory : un tour de la pièce centrale se traduit par un mouvement en **sens inverse** de la pièce flexible de x dents par rapport à la pièce extérieure où x est le nombre de dents en moins sur la pièce flexible par rapport à la pièce extérieure.
- Montage : L'arbre moteur est lié à la pièce centrale et l'arbre de sortie de réducteur est lié à la pièce flexible.
- Le rapport de réduction est donné par $\frac{1}{N} = \frac{D_{interne} - D_{externe}}{D_{interne}} = \frac{-x}{D_{interne}}$. Par exemple pour $D_{interne} = 200$ et $D_{externe} = 202$, $N = -100$.

Harmonic Drive (2)



Circular spline

Flexspline

Wave Generator

Avantages

pas de jeu pour des frottements limités, encombrement et poids très réduits

Inconvénients

flexibilité, montage fin, prix

Exemple de transmission rotation → translation : les vis à billes



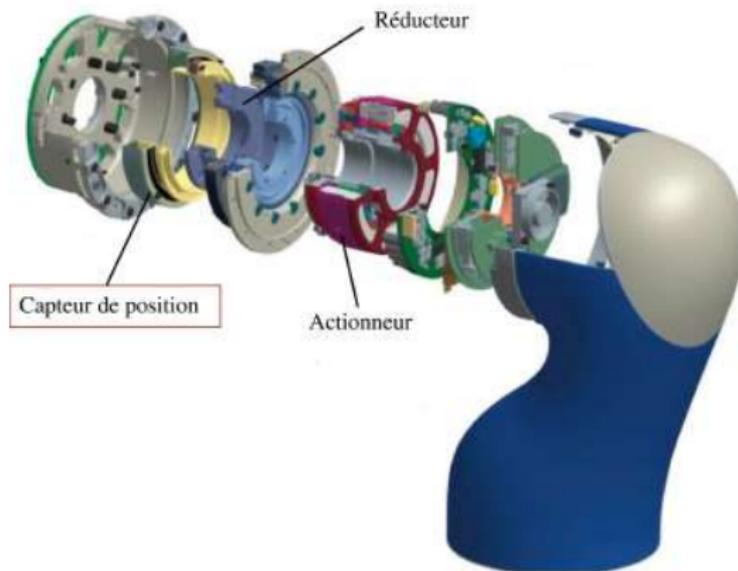
Principe

liaison vis-écrou, avec des billes au niveau du filetage pour limiter les frottements

Caractéristiques

pas de jeu, réversibilité correcte (selon les modèles)

Les capteurs



Vue éclatée d'un axe

Les capteurs : mesure potentiométrique



Principe

Pont diviseur de tension avec une résistance qui varie en fonction du déplacement

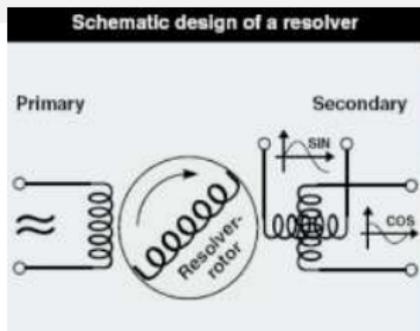
Avantages

simplicité, coût

Inconvénients

Robustesse, immunité aux bruit, vitesse maximale, résolution (dépend du convertisseur A/N)

Les capteurs : le synchro-résolver



Principe

- Excitation du rotor par un champ à fréquence fixe
- Sur le secondaire, on récupère deux tensions : $V_{s1} = k \sin(\theta) \sin(\omega t)$ et $V_{s2} = k \cos(\theta) \sin(\omega t)$ où θ est l'angle de rotation du rotor
- On obtient θ après démodulation

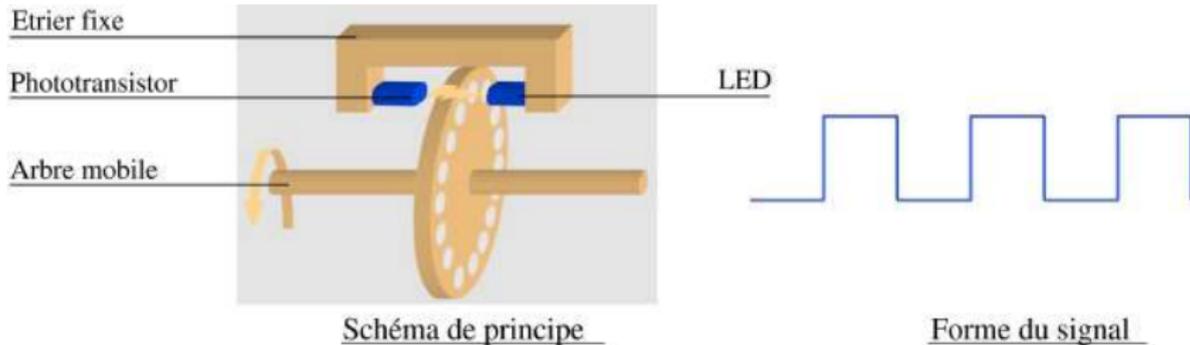
Avantages

robustesse (pas de glissement mécanique, pas sensible à la chaleur)

Inconvénients

Résolution limitée par le CAN

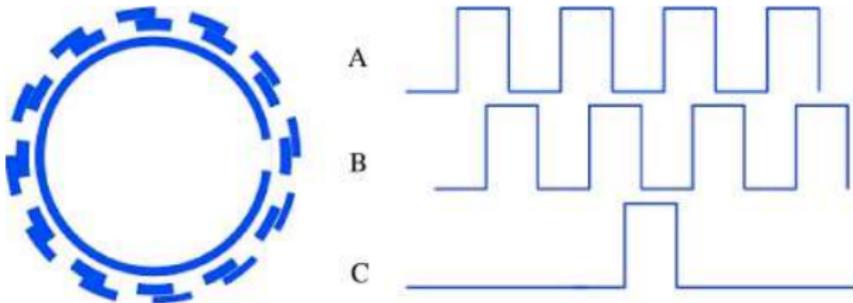
Les capteurs : les codeurs optiques



Principe

- L'arbre tourne, le phototransistor fournit alors un signal carré
- La mesure de position consiste donc en un comptage d'impulsions

Les capteurs : les codeurs optiques incrémentaux



- Deux pistes sont gravés avec un décalage d'un quart de période
- Les signaux A et B sont déphasés de ± 90 degrés. Le signe du déphasage indique le sens de rotation
- La voie C contient une seule encoche et peut être utilisée comme référence

Attention !

C'est bien une position qu'on mesure et le calcul de la vitesse nécessite une dérivation numérique du signal ce qui, en fonction de la période d'échantillonnage et des bruits de mesures, peut poser problème : nécessité d'un filtrage numérique (passe bas).

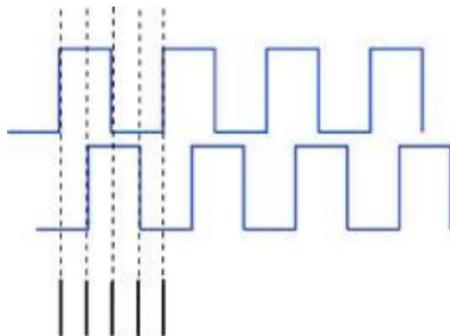
Les capteurs : les codeurs optiques incrémentaux

Résolution

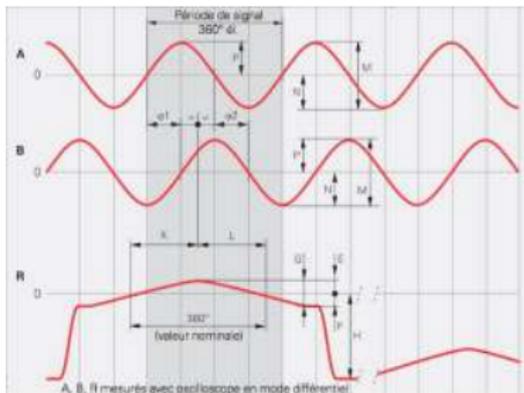
La résolution dépend du nombre d'encoches gravés sur une piste : le nombre de points

Comptage en quadrature

En mode de comptage en quadrature, on détecte les fronts montants et descendants des deux pistes \Rightarrow la résolution est égale à $4 \times$ le nombre de points : On parle du nombre d'impulsions par tour.



Les capteurs : les codeurs optiques incrémentaux Sin/Cos



Principe

Fonctionne comme le codeur incrémental mais les canaux A et B fournissent des sinusoïdes. Une électronique permet de calculer la position à l'intérieur d'une période de base.

Exemple

Un codeur incrémental qui dispose de :

- 500 points fournit 500 impulsions/tour : on a une résolution de $360 \text{ degrés}/500 = 0.72 \text{ degrés}$
- 500 points en comptage en quadrature fournit $500 \times 4 = 2000$ impulsions / tour : on a une résolution de $360 / 2000 = 0.18 \text{ degrés}$
- 500 points en comptage en quadrature et une interpolation Sin/Cos avec 512 points fournit $500 \times 4 \times 512 = 1024000$ impulsions/tour : on a une résolution de $360 / 1024000 = 3e^{-4} \text{ degrés}$

Exercices

Exercice 1

On réalise un asservissement de position avec une période d'échantillonnage de 0.5 ms. On dispose d'un codeur à 512 points. Calculer la vitesse minimale de rotation avec un comptage en quadrature ? Même question avec une interpolation de 512.

Exercices

Exercice 1

On réalise un asservissement de position avec une période d'échantillonnage de 0.5 ms. On dispose d'un codeur à 512 points. Calculer la vitesse minimale de rotation avec un comptage en quadrature ? Même question avec une interpolation de 512.

Solution

- Il faut qu'il y ait au moins une impulsion par période d'échantillonnage $\Rightarrow 1$ impulsion/0.5 ms $\rightarrow 2000$ impulsions/seconde
- Nous disposons de $512 \times 4 = 2048$ impulsions/ tour
- La vitesse minimale mesurable est donc de $2000/2048 \simeq 0.97$ tours/seconde $\simeq 58$ tours/minute
- Avec une interpolation de 512, nous avons $512 \times 4 \times 512 = 1048576$ impulsions/tour. La vitesse minimale est donc de $2000/1048576 \simeq 2e^{-3}$ tours/seconde $\simeq 0.1$ tours/minute

Exercices

Exercice 2

Nous disposons d'un codeur incrémental de 500 points dont la fréquence maximum de transmission des données est de 100 kHz. Calculer la vitesse maximale de rotation.

Exercices

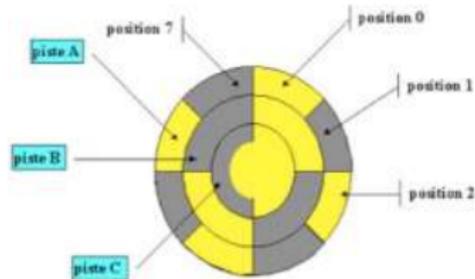
Exercice 2

Nous disposons d'un codeur incrémental de 500 points dont la fréquence maximum de transmission des données est de 100 kHz. Calculer la vitesse maximale de rotation.

Solution

- la fréquence de transmission est de $500 \times (\text{nombre de tour par minute}) / 60$
- donc le nombre de tour par minute est égale à la fréquence de transmission $\times 60 / 500 = 12000$ tours par minute c'est la vitesse maximale de rotation

Les capteurs : les codeurs optiques absolus



- Le codage de la position est absolu (Code Gray)
- Pour un encombrement égal, la résolution est réduite par rapport à un codeur incrémental
- Nombre de fils important (difficulté d'intégration)

Placement des capteurs

- Pour augmenter la résolution, il est préférable de placer le capteur sur le moteur plutôt que sur le corps de sortie (déplacement N fois plus grand)
- Problème : au démarrage, si on mesure la position du moteur, on ne connaît pas la position de l'arbre de sortie
- On ajoute donc en général un second capteur sur la sortie. La mesure de sortie permet de déterminer dans quel tour se trouve le moteur au démarrage
 - L'égalité des mesures impose : $q_s \pm \delta_s = \frac{1}{N} (q_m \pm \delta_m + 2\pi n)$
 - On obtient alors $n = \frac{N(q_s \pm \delta_s) - (q_m \pm \delta_m)}{2\pi}$
 - n est entier et donc l'erreur sur n vaut $\frac{N\delta_s + \delta_m}{2\pi}$
 - Pour pouvoir retrouver n sans erreur, il faut vérifier $\frac{N\delta_s + \delta_m}{2\pi} < \frac{1}{2}$, soit, si les deux capteurs ont la même précision δ , $\delta < \frac{\pi}{N+1}$.
- Si le codeur sur l'arbre moteur est incrémental, il y a un problème supplémentaire : au démarrage, on ne connaît pas la position de l'arbre moteur
 - déplacer le bras dans un sens arbitraire, jusqu'à un top tour (voie C).
 - instancier la mesure moteur à $q_m = 0$
 - Utiliser la procédure précédente pour trouver le nombre de tours moteur à partir de la mesure absolue en sortie

On utilise une mesure incrémentale côté moteur et une mesure absolue côté charge (pour l'initialisation)

Utilisation des butées



Permet d'éviter l'utilisation d'un capteur sur l'arbre de sortie

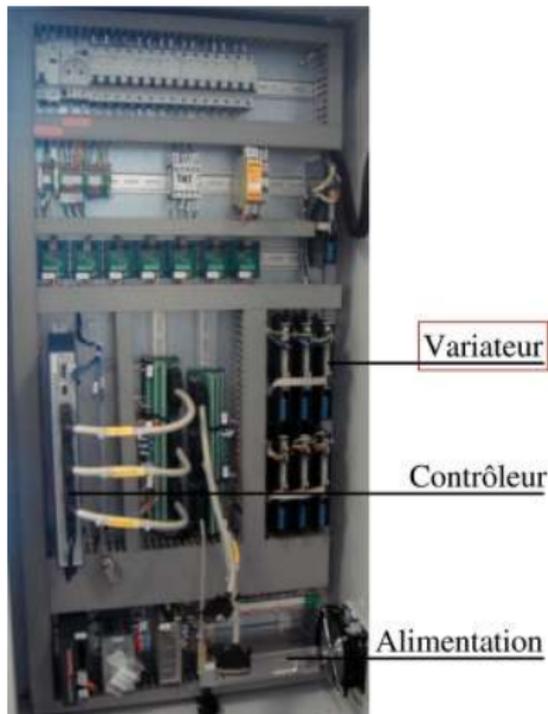
Procédure de recalage :

- L'axe se déplace (lentement !) en direction de la butée
- Lorsque la butée est détectée, on connaît la position de la sortie (à la "résolution" de la butée près).
- On instancie la mesure côté moteur à $q_m = q_0$, correspondant à la position apprise pour la butée
- Éventuellement, si cette procédure n'est pas assez précise (résolution de la butée insuffisante), on peut effectuer un mouvement de dégagement de l'axe jusqu'au prochain top tour sur la voie C, et on instancie la mesure côté moteur à $q_m = q_1$, correspondant à la position apprise pour "le premier top tour en partant de la butée". Cette position est atteinte avec une résolution égale à celle du codeur monté sur l'arbre moteur (grande résolution)

Rappel du plan

- 1 Organisation et contenu de l'UE
 - Fonctionnement et contrôle des connaissances
 - Contenu de l'UE
- 2 Introduction
 - Etymologie et définition
 - Types de robots
 - Applications de la robotique
 - Caractéristiques d'un robot manipulateur
 - Introduction à la problématique du contrôle
 - Elements technologiques principaux
- 3 **Constitution d'un système robotique**
 - Composition d'un axe de robot
 - Les actionneurs
 - Les transmissions
 - Les capteurs
 - **Composition d'une armoire de commande**
 - Les variateurs
 - Le contrôleur
- 4 Références

Les variateurs



Les variateurs : Rôle

Le rôle du variateur :

- **Amplificateur de puissance**

Par exemple, une sortie analogique $\pm 10V$, 50mA (0,5 W maxi) ne peut alimenter un moteur électrique 10V-3A maxi (30 W)

- **Asservissements bas-niveau**

- Un asservissement de courant
- Un asservissement de vitesse (Optionnel)
- Un asservissement de position (Optionnel)

- **Gestion des sécurités**

- Protection contre les surcharges
- Arrêt d'urgence

Les variateurs : Schéma de principe

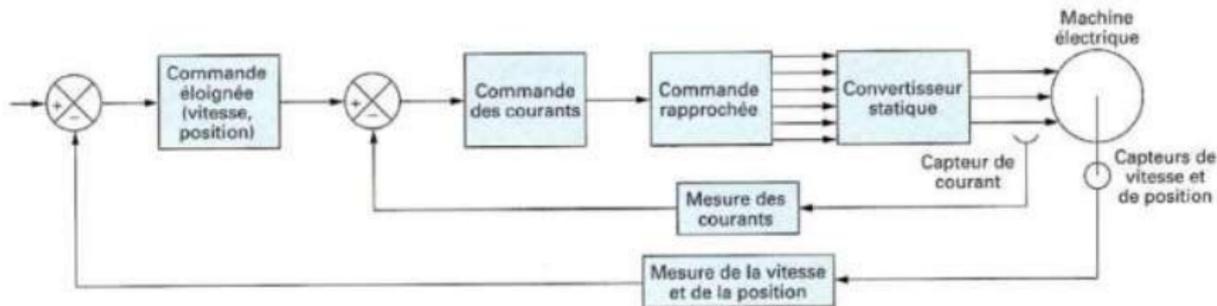


Schéma général d'un variateur de vitesse [J-P Louis – techniques de l'ingénieur]

Variateur de vitesse : cas de la mcc

Le correcteur de courant

- Généralement un correcteur analogique (à base d'amplificateurs opérationnels)
- Asservissement du courant dans le moteur (voir plus loin dans ce cours)

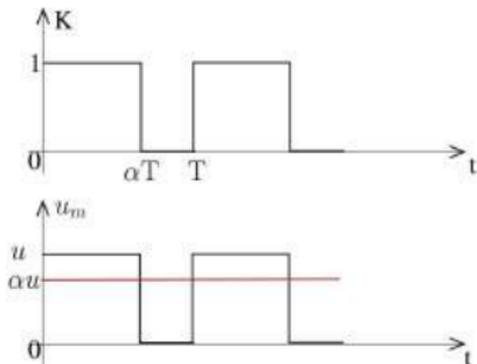
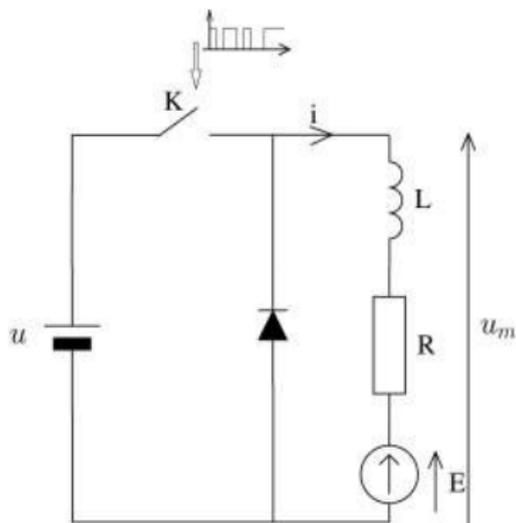
Le correcteur vitesse

- Généralement un correcteur analogique
- Asservissement de la vitesse du moteur (voir plus loin dans ce cours)

Le convertisseur statique et sa commande rapprochée

- Hacheur (conversion continu/continu) commandé par MLI
- Amplification de la puissance
- Obtention d'une source de tension continue réglable à partir d'une alimentation continue

Variateur de vitesse de la mcc : formes d'ondes (1)

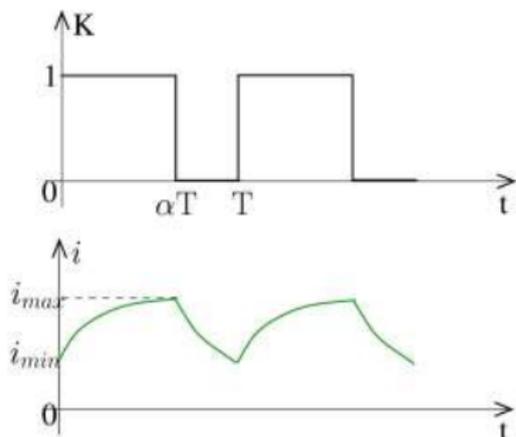


- α : Rapport cyclique
- La période de hachage T est petite \Rightarrow valeur moyenne perçue par le moteur :

$$\bar{u}_m = \frac{1}{T} \int_0^T u_m(t) dt = \alpha u$$

On fait varier la tension aux bornes du moteur en faisant varier α

Variateur de vitesse de la mcc : formes d'ondes (2)



- $t \in [0, \alpha T]$

- $u = Ri + L \frac{di}{dt} + E$

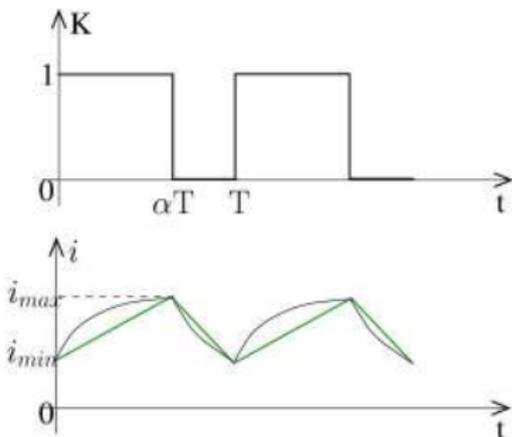
$$\Rightarrow i(t) = \left(i_{min} - \frac{u-E}{R} \right) e^{-\frac{R}{L}t} + \frac{u-E}{R}$$

- $t \in [\alpha T, T]$

- $0 = Ri + L \frac{di}{dt} + E$

$$\Rightarrow i(t) = \left(i_{max} + \frac{E}{R} \right) e^{-\frac{R}{L}(t-\alpha T)} - \frac{E}{R}$$

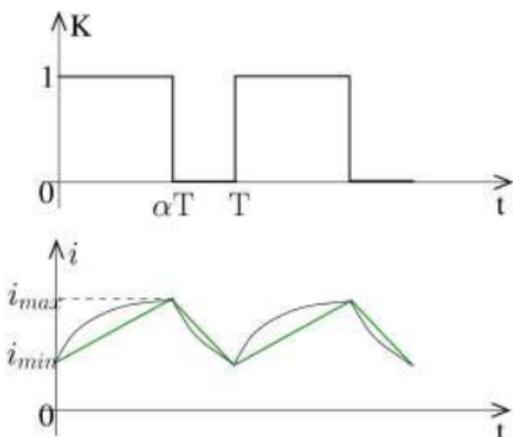
Variateur de vitesse de la mcc : formes d'ondes (2)



- $t \in [0, \alpha T]$
 - $u = Ri + L \frac{di}{dt} + E$
 - $\Rightarrow i(t) = \left(i_{min} - \frac{u-E}{R} \right) e^{-\frac{R}{L}t} + \frac{u-E}{R}$
- $t \in [\alpha T, T]$
 - $0 = Ri + L \frac{di}{dt} + E$
 - $\Rightarrow i(t) = \left(i_{max} + \frac{E}{R} \right) e^{-\frac{R}{L}(t-\alpha T)} - \frac{E}{R}$

• $\tau \gg T$: On ne voit pas des exponentielles mais des segments de droites

Variateur de vitesse de la mcc : formes d'ondes (2)



- $t \in [0, \alpha T]$
 - $u = Ri + L \frac{di}{dt} + E$
 - $\Rightarrow i(t) = \left(i_{min} - \frac{u-E}{R} \right) e^{-\frac{R}{L}t} + \frac{u-E}{R}$
- $t \in [\alpha T, T]$
 - $0 = Ri + L \frac{di}{dt} + E$
 - $\Rightarrow i(t) = \left(i_{max} + \frac{E}{R} \right) e^{-\frac{R}{L}(t-\alpha T)} - \frac{E}{R}$

- $\tau \gg T$: On ne voit pas des exponentielles mais des segments de droites
- La valeur moyenne du courant \bar{i} est imposé par le couple moteur
- Pour diminuer l'ondulation du courant, on peut augmenter L

Variateur de vitesse de la mcc : hacheur 4 quadrants

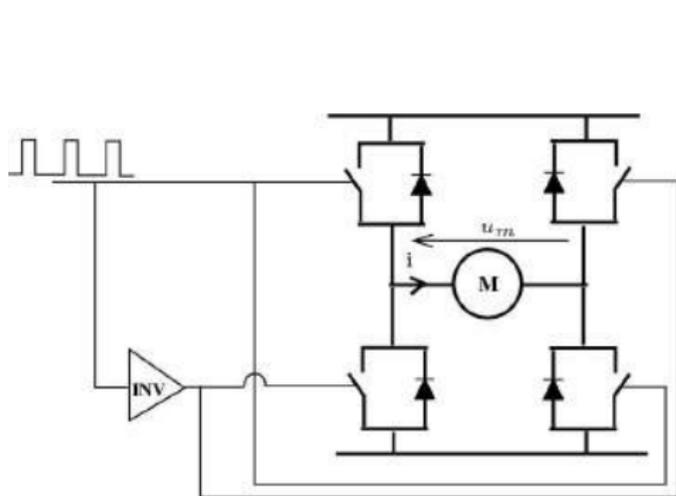
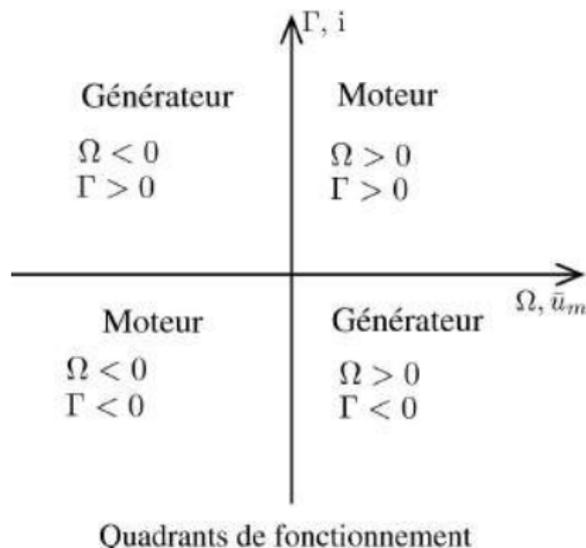
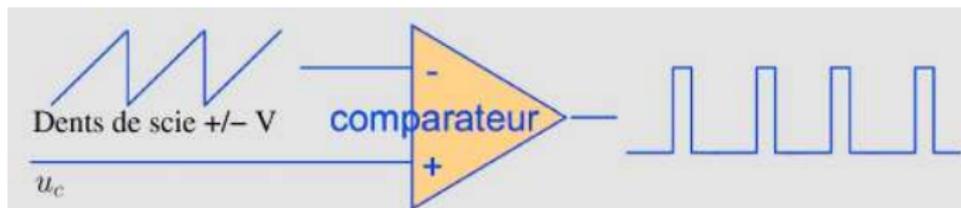


Schéma de principe d'un hacheur 4-quadrants

- Hacheur quatre quadrants : $\bar{u}_m = (2\alpha - 1)u$
- Fonctionnement en générateur : moyen de freinage



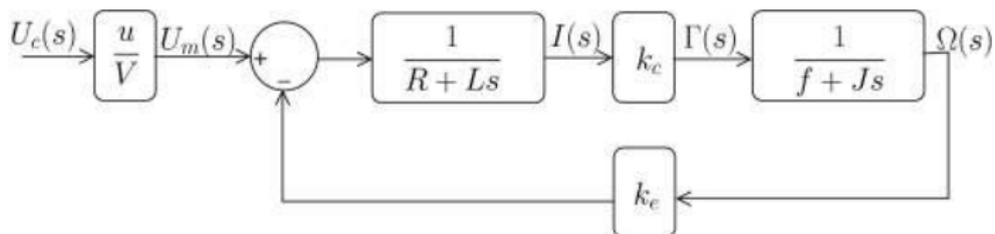
Variateur de vitesse de la mcc : Génération du signal MLI



- Notre sortie de commande est une tension analogique dans $[-V, V]$
- A partir de cette commande on génère un signal modulé en largeur d'impulsion par le montage ci-dessus.
- Le rapport cyclique est $\alpha = \frac{1}{2} \left(\frac{u_c}{V} + 1 \right)$

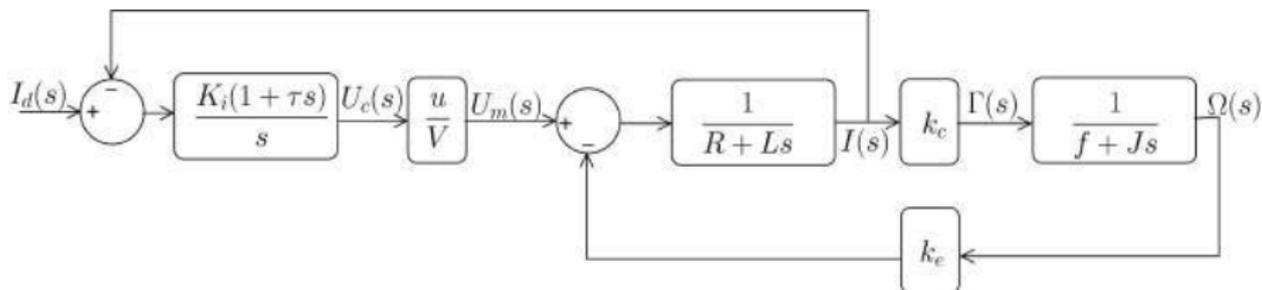
$$\text{On obtient que : } u_c = \frac{u}{V} \bar{u}_m \simeq u_m$$

Variateur de vitesse de la mcc : Modélisation du hacheur



En résumé l'amplificateur de puissance est modélisé par un gain : $\frac{u}{V}$

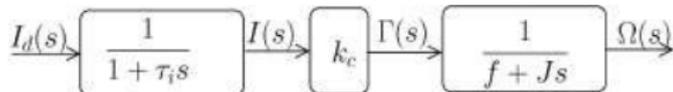
Variateur de vitesse de la mcc : La boucle de courant (1)



Rôle de la boucle d'asservissement de courant

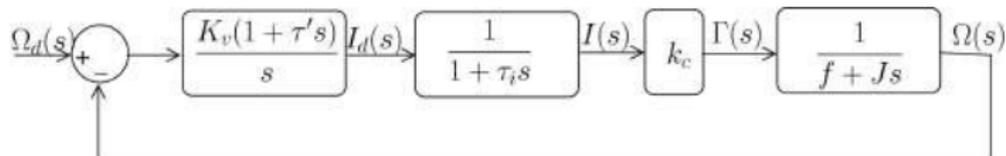
- Maîtriser le courant maximum
- Accélérer l'application du courant (temps de réponse inférieur à 1 ms) et donc du couple en rejetant la f.c.e.m considérée comme une perturbation lente
- Avec le zéro du correcteur on compense la constante de temps électrique

Variateur de vitesse de la mcc : La boucle de courant (2)



- Quand le correcteur de la boucle de courant est bien réglé, on considère que la f.c.e.m est parfaitement rejetée
- Le moteur avec sa boucle de courant se met alors sous la forme du schéma bloc ci-dessus avec τ_i égale à qq. dixièmes de ms
- Vu du contrôleur, la réponse de courant peut être considérée comme instantanée et on peut considérer qu'on commande directement le couple

Variateur de vitesse de la mcc : La boucle de vitesse



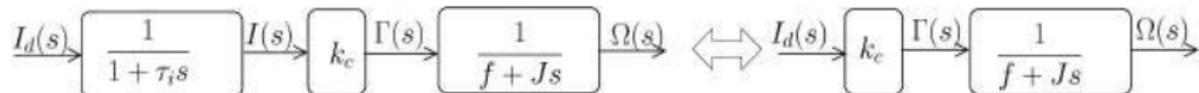
Rôle de la boucle de vitesse

- Permettre au contrôleur un accès direct aux vitesses du robot
- Rejet des frottements secs et atténuation des effets des couplages (voir plus loin dans le cours)
- Bande passante typique en boucle fermée entre 20 et 60 Hz
- Correcteur de type PI avec compensation de la constante de temps mécanique

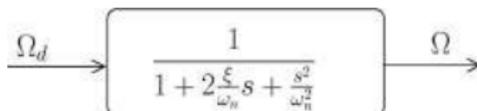
Le variateur vu du contrôleur

En résumé, vu du contrôleur numérique :

- **L'axe est commandé en couple**

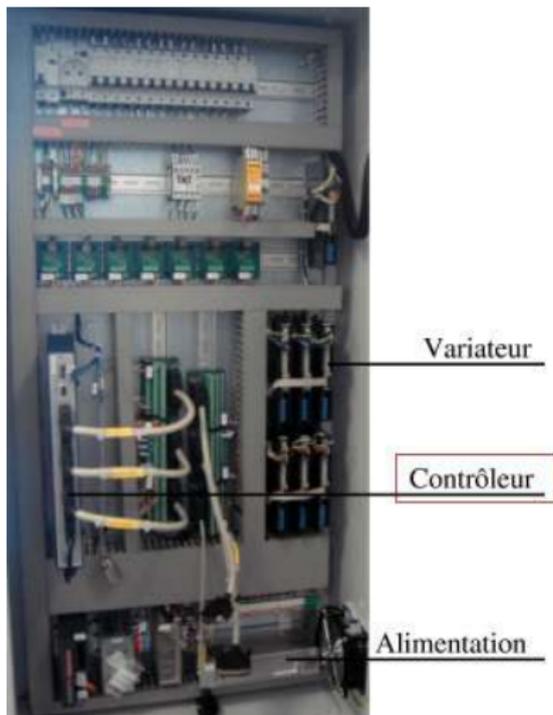


- **L'axe est commandé en vitesse**

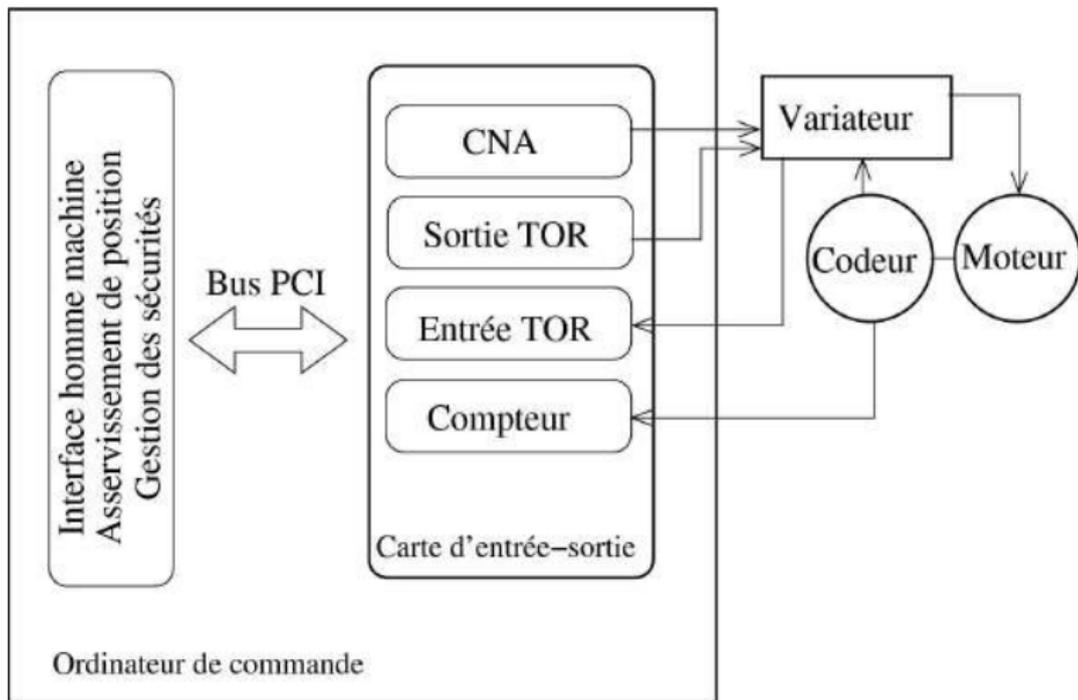


Chacun de ces deux modèles suppose une mécanique linéaire, d'inertie constante, sans jeu, sans frottements, sans couplages

Le contrôleur



Le contrôleur



Cartes d'interface



- Les cartes d'entrée sortie sont l'interface entre le contrôleur et le robot
- Elles sont placées sur un bus de données (bus PCI par exemple) de l'ordinateur où se trouve le contrôleur
- Elles comprennent entre autres des :
 - des Convertisseurs Numérique Analogique : pour envoyer la commande calculé aux variateurs
 - des compteurs : pour lire les informations codeurs
- Elles sont accessibles grâce à driver et une bibliothèque de fonctions
- Parfois ces cartes comportent un micro-contrôleur qui réalise un asservissement de position : on parle alors de carte d'axe

Exercice ¹

On souhaite réaliser un axe asservi qui répond au cahier des charges suivant :

- Accélération de 10 tours/s/s
 - Vitesse maximale de 3 tours/s
 - Vitesse minimale de 0.01 tour/s
 - Résolution : 5e-5 rad
 - Moment d'inertie ramené en sortie de réducteur : 0.1 kg.m.m
 - Période d'échantillonnage du correcteur : 500 μ s
- 1 Quel est le couple nécessaire à la sortie du réducteur ?
 - 2 Quelle est la vitesse nécessaire à la sortie du réducteur ?
 - 3 Est ce que les moteurs suivants avec des réducteurs judicieusement choisis (disponible 40 ou 80) conviendraient à l'application ?
 - Maxon 167178 : 120W, 24V, 0.11 Nm à 5000 t/min, 0.1 Nm à 10000 t/min
 - Maxon 148877 : 150W, 48V, 0.2 Nm à 8200 t/min
 - 4 Choisir un codeur optique incrémental numérique (nombre de points) adéquat

Rappel du plan

- 1 Organisation et contenu de l'UE
 - Fonctionnement et contrôle des connaissances
 - Contenu de l'UE
- 2 Introduction
 - Etymologie et définition
 - Types de robots
 - Applications de la robotique
 - Caractéristiques d'un robot manipulateur
 - Introduction à la problématique du contrôle
 - Elements technologiques principaux
- 3 Constitution d'un système robotique
 - Composition d'un axe de robot
 - Les actionneurs
 - Les transmissions
 - Les capteurs
 - Composition d'une armoire de commande
 - Les variateurs
 - Le contrôleur
- 4 **Références**

Bibliographie

- ① G. Morel. Commande en robotique de modélisation. Ancien cours de master de robotique à Paris 6.
- ② J. Gangloff. [Robotique de manipulation, Cours de l'École Nationale Supérieure de Physique de Strasbourg](#)
- ③ B. Bayle. [Technologie des asservissements, variateurs de vitesse, Cours de l'École Nationale Supérieure de Physique de Strasbourg](#)
- ④ F. Bernot. Hacheurs : Fonctionnement, Techniques de l'ingénieur.
- ⑤ J-P Louis, B. Multon, Y. Bonnassieux et M. Lavabre. Commande des Machines à Courant Continu (mcc) à Vitesse Variable. Techniques de l'Ingénieur.
- ⑥ [Maxon](#)
- ⑦ W. Khalil & E. Dombre. Modeling, Identification and Control of Robots. Hermes Penton Science, 2002.
- ⑧ L. Sciavicco & B. Siciliano. Modelling and control of robot manipulators, 2nd Edition. Springer, 2000.
- ⑨ K. J. Åström & T. Häggglund. PID Controllers : Theory, Design, and Tuning, 2nd Edition. ISA, 1995.
- ⑩ B. Siciliano & L. Villani. Robot Force Control, Kluwer Academic Publishers, Boston, 1999.
- ⑪ J. Craig. Introduction to Robotics : Mechanics and Control. Third Edition. Prentice Hall, 2004.

Commande des Systèmes Robotiques - 5AR01

Introduction et éléments technologiques

Support de cours réalisé en collaboration avec Wael BACHTA

Vincent PADOIS

`vincent.padois@upmc.fr`

Université Pierre et Marie Curie
Institut des Systèmes Intelligents et de Robotique (CNRS UMR 7222)

