Cours EDSYS - Commande Adaptative

Jean-Marc BIANNIC - DCSD-ONERA - Toulouse

Denis EFIMOV - IMS - Université de Bordeaux 1

Dimitri PEAUCELLE - LAAS-CNRS - Université de Toulouse

Toulouse Mai 2011

Commande adaptative

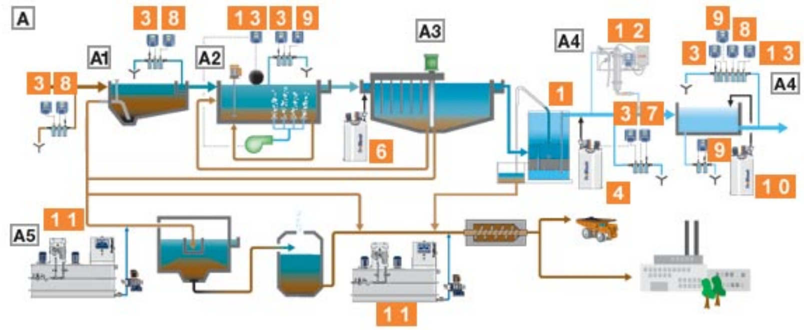
- Automatique / Théorie de la commande
- Commande de systèmes dynamiques
  - Représentés par des équations différentielles (systèmes à temps continu)
  - ou par des équations récurrentes (systèmes à temps discret)
- Modèles non-linéaires dans l'espace d'état

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = f(x,u,t) \\ y(t) = g(x,u,t) \end{cases} \quad \text{ou} \quad \begin{cases} x_{k+1} = f(x,u,k) \\ y_k = g(x,u,k) \end{cases}$$

  - x : état du système
  - u : commandes du système (actionneurs)
  - y : mesures du système (capteurs)

Systèmes dynamiques, exemples

© AIRBUS S.A.S. - H. Goussé

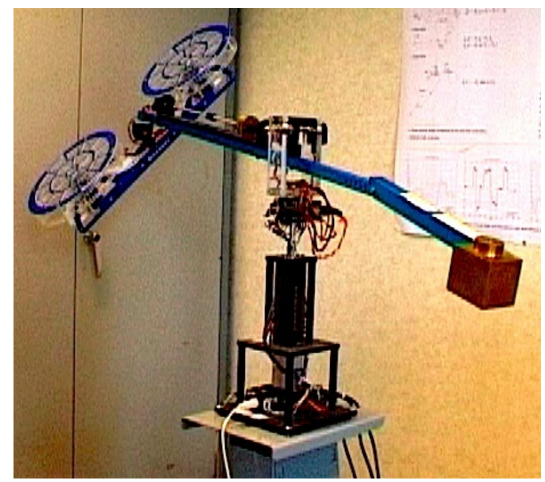


© ProMinent

© CNES - ill. D. Ducos

HRP-2 Promet

@ Astrium - Ariane 5



@ Quanser - 3DOF hélico

Modélisation pour la commande

- Isoler un comportement dynamique
  - Découplage par axes - mouvement longitudinaux/latéraux d'un avion
  - Découplage temporel - incidence/remplissage réservoir d'un lanceur
  - Découplage par modes - rejoindre destination / positionnement précis
  - Découplage fréquentiel - échantillonnage, dynamiques composants
- Définir trajectoire/position de référence
  - Termes non-linéaires négligés, simplifiés ou linéarisés
  - Enoncé de performances à atteindre
  - Enoncé de contraintes à satisfaire
- Tenir compte de méconnaissances
  - Tous les phénomènes physiques n'ont pas de description concise
  - Paramètres varient d'un produit manufacturé à l'autre
  - Identification de paramètres est toujours entachée d'erreur

- Les modèles obtenus
- dépendent de paramètres θ
  - (mode, état d'une dynamique lente, trajectoire de référence...)
  - connus, choisis ou mesurables (avec une certaine précision)
- dépendent d'incertitudes δ
  - (dynamiques négligées, approximations, méconaissances...)
  - inconnus mais bornés, à dynamiques nulles, lentes ou bornées
- sont influencés par des perturbations w
  - (phénomènes, couplages, fréquences négligées... et trajectoire)
  - inconnus, avec caractéristiques fréquentielles, temporelles, énergétiques...
- doivent satisfaire des contraintes sur certaines composantes z
  - (performances, validité des hypothèses de modélisation...)
  - caractéristiques fréquentielles, temporelles, énergétiques...

- Modèles non-linéaires dans l'espace d'état

$$\Sigma(\theta,\delta) : \begin{cases} \dot{x}(t) = f(x,u,t,w,\theta,\delta) \\ y(t) = g(x,u,t,w,\theta,\delta) \\ z(t) = h(x,u,t,w,\theta,\delta) \end{cases}$$

- Etapes de modélisation permettent simplifications
  - Découplage temporel $f(x,u,t) \longrightarrow f(x,u,\theta)$
  - Linéarisation $f(x,u,\theta) \longrightarrow A(\delta,\theta)x + B(\delta,\theta)u$

    avec δ bornée sous contraintes sur certaines composantes z de l'état
  - ...
- Exemples
  - $\cos(t)x(t) \longrightarrow \theta(t)x(t)$ avec $\theta \in [-1\ \ 1]$
  - $x_1(t)x_2(t) \longrightarrow \delta(t)x_2(t)$ avec $\delta \in [-1\ \ 1]$ si $z = x_1 \in [-1\ \ 1]$

- Commande classique : synthèse pour $\theta = \theta_0$ fixé, sans incertitudes $\delta = 0$

$$\Sigma(\theta_0, 0) : \begin{cases} \dot{x}(t) = f(x, u, t, w, \theta_0, 0) \\ y(t) = g(x, u, t, w, \theta_0, 0) \\ z(t) = h(x, u, t, w, \theta_0, 0) \end{cases} \qquad \Sigma_c : \begin{cases} \dot{\eta}(t) = f_c(\eta, y, t) \\ u(t) = g_c(\eta, y, t) \end{cases}$$

- Exemple : synthèse LQG - $\min \|z\|_2$ sous w bruit blanc gaussien

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = A_{\theta_0}(t)x(t) + B_{\theta_0}(t)u(t) + w_1(t) \\ y(t) = C_{\theta_0}(t)x(t) + w_2(t) \\ z_1(t) = Q^{1/2}(t)x(t) \\ z_2(t) = R^{1/2}(t)u(t) \end{cases}$$

$$\begin{cases} \dot{\eta}(t) = (A_{\theta_0}(t) - L(t)C_{\theta_0}(t) - B_{\theta_0}(t)K(t))\eta(t) + L(t)y(t) \\ u(t) = -K(t)\eta(t) \end{cases}$$

- <u>Commande classique</u> : synthèse pour $\theta = \theta_0$ fixé, sans incertitudes $\delta = 0$
- Commande en boucle fermée est intrinsèquement robuste, mais ...
  - Stabilité préservée en réponse à des perturbations non-modélisées, faibles
  - Comportement inchangé pour <u>petits</u> écarts de θ et δ
  - Performances fortement dégradées pour écarts <u>moyens</u>
  - Risque d'instabilité pour <u>grands</u> écarts
- Tenir compte des écarts
  - Commande robuste
  - Commande adaptative
  - Commande adaptative robuste

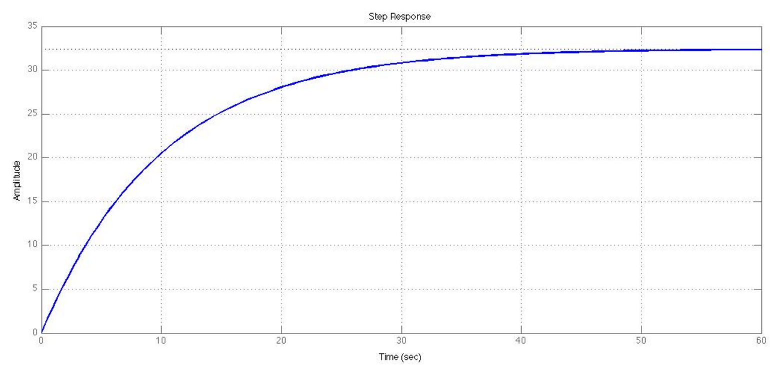
- Exemple très simple : moteur à courant continu

$$I\dot{\omega} = -f\omega + Ku \quad , \quad \omega = \frac{k}{Is+f}u$$

- Inertie I dépend de la charge : incertitude
- k, f paramètres mal connus, peuvent dépendre de conditions d'utilisation
- Modèle du premier ordre : dynamiques électriques négligées

$$u = \frac{1}{\tau_e p + 1}v \ , \ \tau_e \ll I/f$$

- $\forall k, I, f$ le système est stable, son comportement est similaire

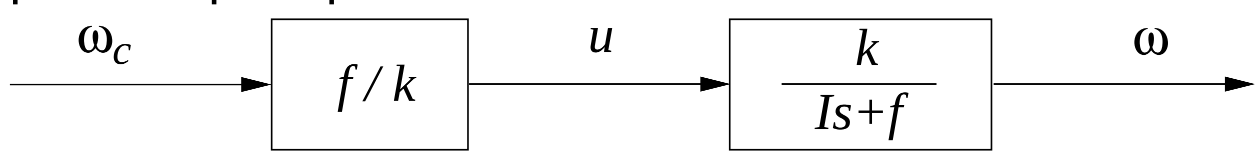


Introduction

Exemple très simple : moteur à courant continu

$$I\dot{\omega} = -f\omega + Ku \quad , \quad \omega = \frac{k}{Is+f}u$$

- Gain statique k/f : pour $u = u_o$ on a $\qquad \omega(t) \overset{t\to\infty}{\longrightarrow} ku_o/f$
- Indépendamment des dynamiques, on veut $\qquad \omega(t) \overset{t\to\infty}{\longrightarrow} \omega_c$
- Solution la plus simple : précommande



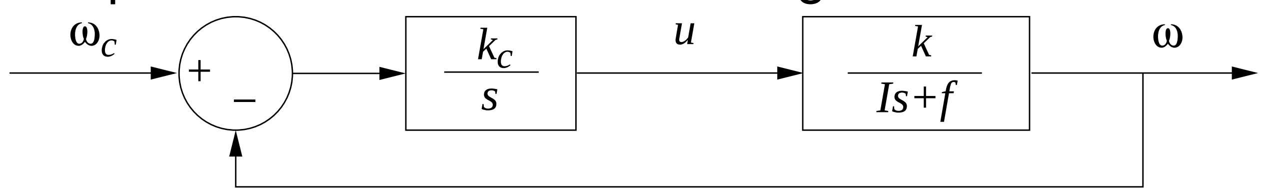
  - Si f et k sont inconnues : comment choisir le gain ?
  - Attendre que le régime permanent s'établisse et choisir le gain ?
  - Règles logiques ou adaptation continue ?
  - Convergence plus lente que système initial ?
  - Preuve de stabilité ?

■ Exemple très simple : moteur à courant continu

$$I\dot{\omega} = -f\omega + Ku \quad , \quad \omega = \frac{k}{Is+f}u$$

● Indépendamment des dynamiques, on veut $\omega(t) \overset{t\to\infty}{\longrightarrow} \omega_c$

● Solution classique : boucle fermée avec intégrateur



▲ Si $k_c \ll 1$ le système est très lent

▲ Si $k_c \gg 1$ très oscillant (voir instable si on remet les dynamiques électriques)

▲ Valeur idéale (le plus rapide possible sans oscillations) $k_c = f^2/4Ik$

(il est 2 fois plus lent que le système en boucle ouverte)

▲ Comment choisir k_c ?

▲ Diminuer si oscillations ? Augmenter sinon ?

▲ Adapter ? à quelle vitesse ? Preuve de stabilité ?

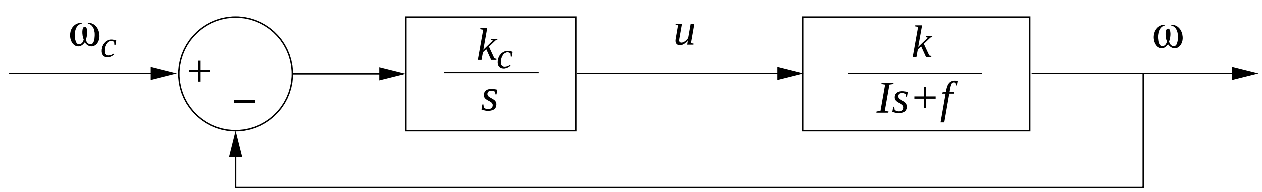
- Modèles non-linéaires dans l'espace d'état

$$\Sigma(\theta,\delta) : \begin{cases} \dot{x}(t) = f(x,u,t,w,\theta,\delta) \\ y(t) = g(x,u,t,w,\theta,\delta) \\ z(t) = h(x,u,t,w,\theta,\delta) \end{cases}$$

- Tenir compte des écarts
  - Commande robuste
  - Commande adaptative
  - Commande adaptative robuste

$$\Sigma(\theta,\delta):\begin{cases}\dot{x}(t)=f(x,u,t,w,\theta,\delta)\\ y(t)=g(x,u,t,w,\theta,\delta)\\ z(t)=h(x,u,t,w,\theta,\delta)\end{cases}\qquad \Sigma_c:\begin{cases}\dot{\eta}(t)=f_c(\eta,y,t)\\ u(t)=g_c(\eta,y,t)\end{cases}$$

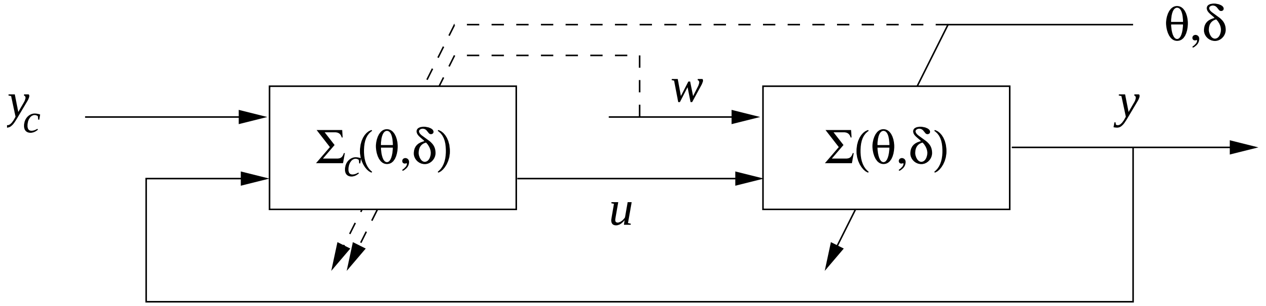
- Commande robuste : valide pour toutes valeurs des paramètres et incertitudes
- Certificat de stabilité pour toutes les valeurs de θ et δ
- Borne garantie sur les performances du système
- Exemple :



  - $k_c \leq \max(\frac{f^2}{4Ik})$: boucle-fermée garantie sans oscillations
  - $\min(\frac{\tau f - I}{\tau^2 k}) \leq k_c$: convergence garantie avec constante de temps $\geq \tau$
  - Performances indicatives en supposant paramètres constants
- Avantage : simplicité de la loi de commande / Désavantage : pire cas

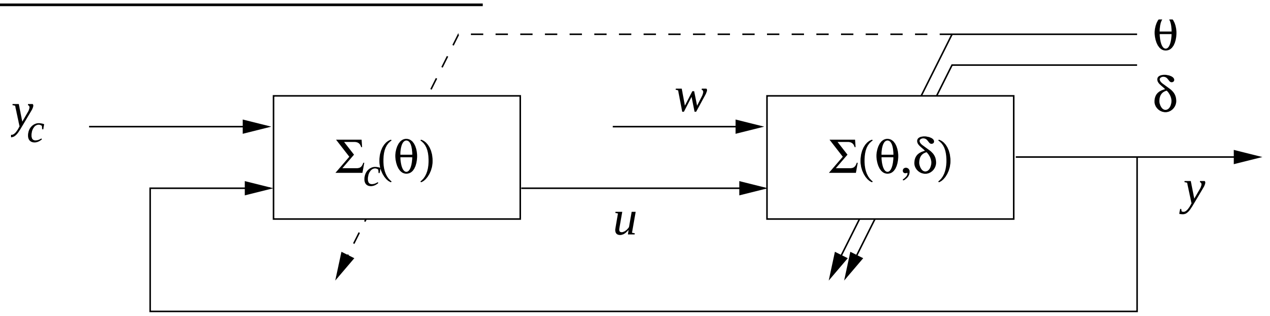
■ Commande adaptative :

“Modifier le comportement de la loi de commande en réponse à des modifications dans les dynamiques du processus à contrôler et des perturbations”



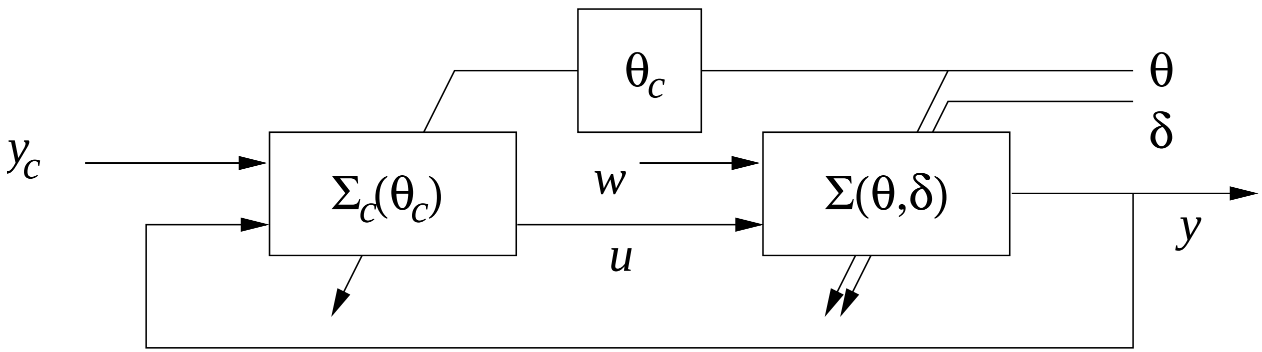
- ▲ Suppose de connaître θ, δ, w. Comment ?
- ▲ Impose un choix de loi d’adaptation. Lequel ?
- ▲ Le schéma global est non-linéaire. Preuves de stabilité ?

■ Commande adaptative robuste :



■ Commande adaptative - Séquencement de gain

● Hypothèses : θ connu en temps réel, varie lentement dans le temps



▲ Calculer régulièrement les paramètres *(optimaux, robustes...)* de Σ_c

▲ Choisir les paramètres de Σ_c dans une table de valeurs pré-calculées (commande tabulée)

▲ Définir a priori une fonction $\theta_c(\theta)$

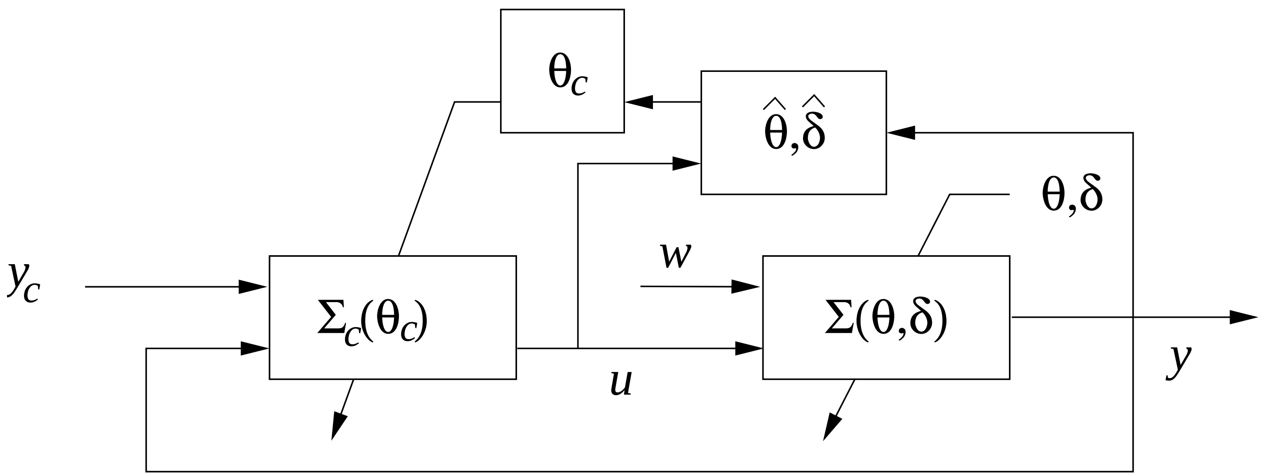
(Quand Σ_c est linéaire : commande Linéaire à Paramètres Variants, LPV)

● Variations temporelles de θ induisent des comportements non-linéaires

● Et si θ n'est pas mesurée ?

Commande adaptative indirecte

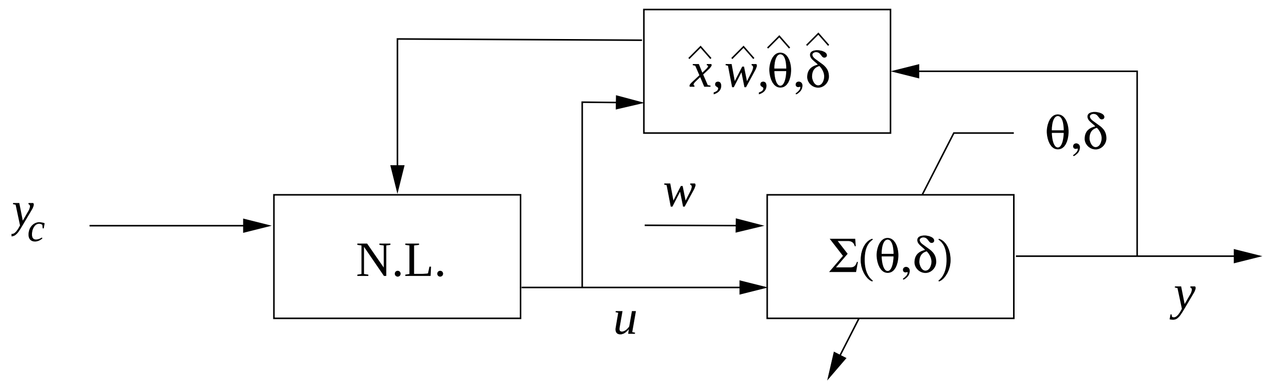
- Hypothèses : θ, δ varient lentement dans le temps
- Estimation paramétrique en temps réel : estimées $\hat{\theta}, \hat{\delta}$



- Principe de séparation :
  - Dynamiques d'estimation/séquencement de gain

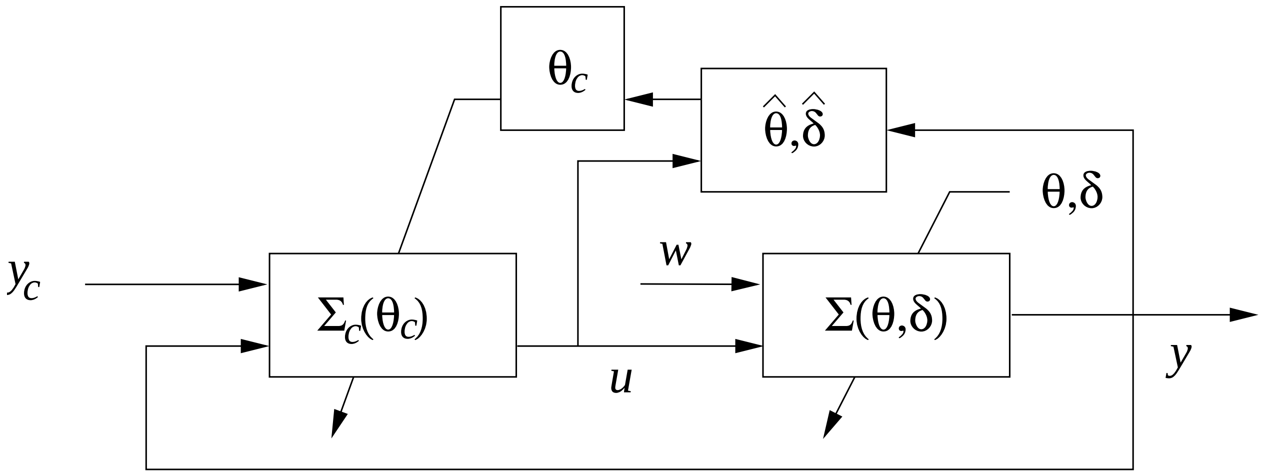
    n'ont pas/peu d'influence sur la dynamique globale
  - Estimation indépendante de Σ_c
- Différentes techniques d'estimation : moindres carrés, gradient, projections...
- Précision d'estimation : besoin d'excitation permanente

- Commande adaptative indirecte
- Si les dynamiques de Σ sont suffisamment lentes : estimation de l'hyper-état

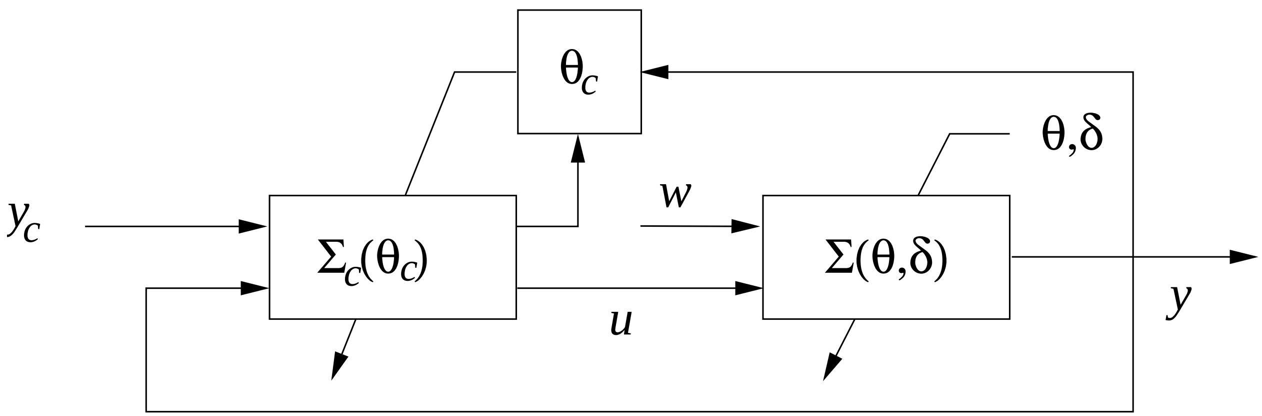


- Dynamiques de θ et celles de x peuvent être proches
- Généralise le schéma : retour d'état/observateur
- Problème d'estimation très complexe
- Commande fortement non linéaire, grandes dimensions

Commande adaptative indirecte



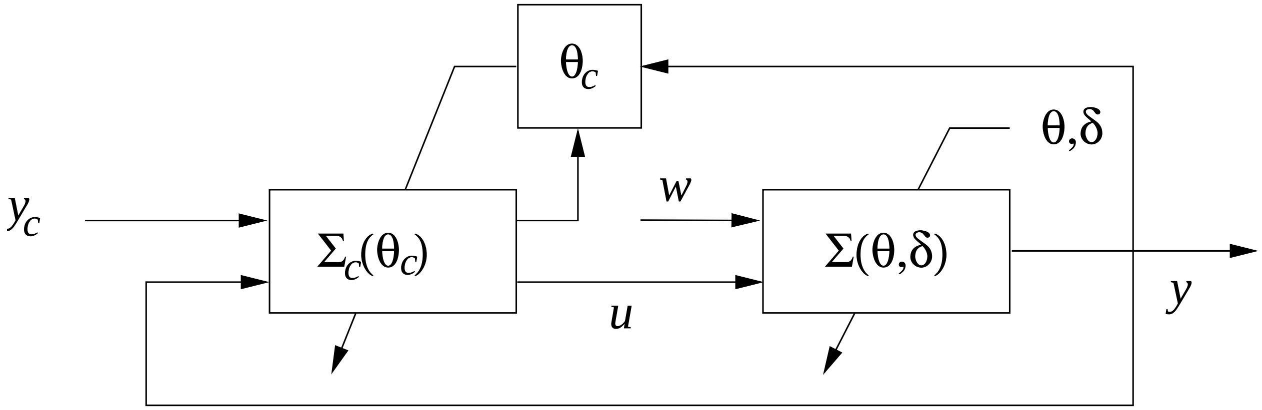
Commande adaptative directe



- Si $\theta_c = F(\theta, \delta)$ et F inversible :

  le calcul de θ_c est un problème d'estimation pour $\Sigma(F^{-1}(\theta_c))$
- "MIT rule" : heuristique quand F est inconnue

Commande adaptative directe



- Schéma de commande plus simple

  (parfois appelée “simple adaptive control”, [Barkana])

- Possibilité d’obtenir des preuves de stabilité de la boucle fermée complète

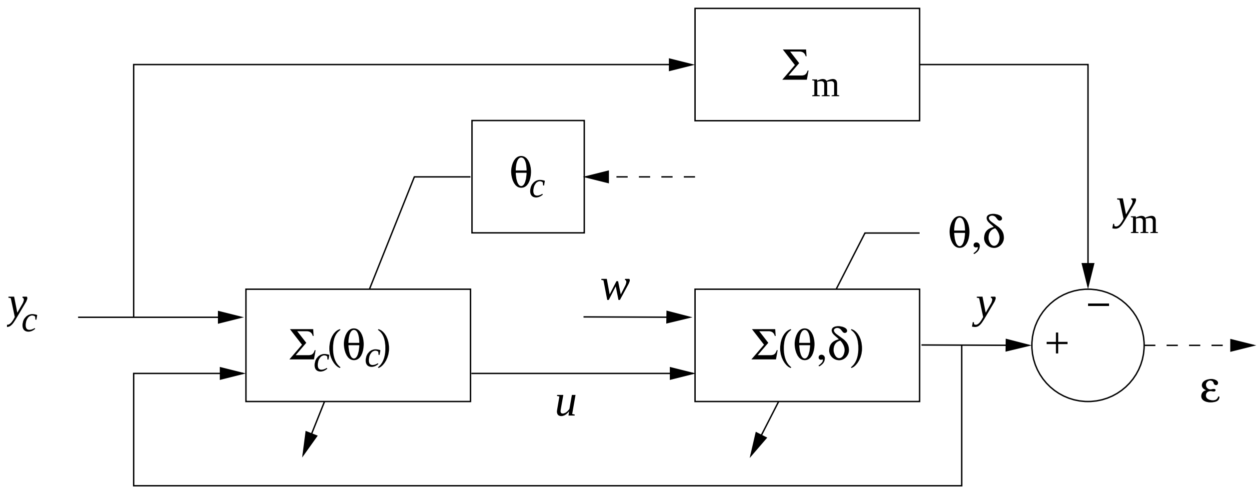
  (sans principe de séparation)

  - Résultats de stabilité par la théorie de Lyapunov
  - Limitations : Hypothèses de passivité sur Σ

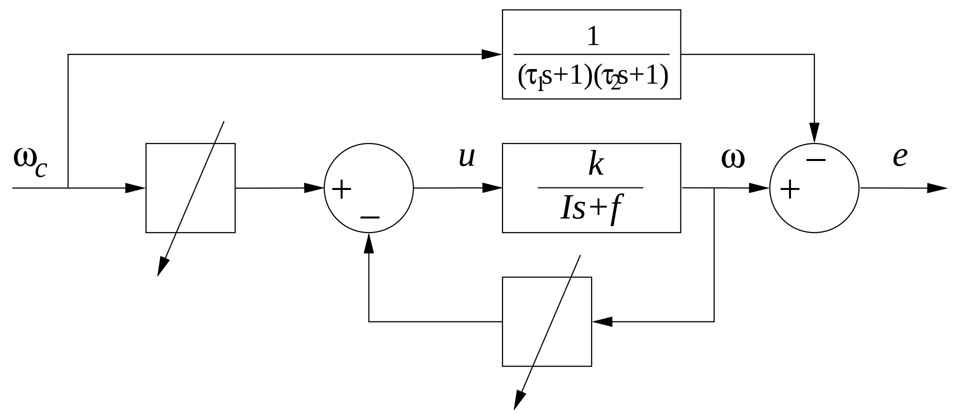
    (parfois appelée “passivity-based adaptive control”, [Fradkov])

Commande adaptative à modèle de référence - MRAC

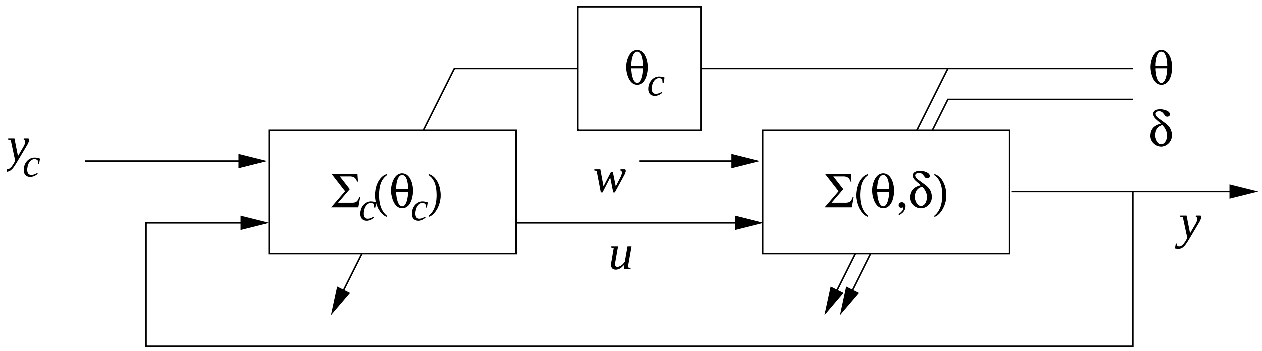
- Jusqu'ici : régulation autour d'un point d'équilibre
- Résultats s'étendent à : adaptation pour suivre comportement de référence



- Exemple : Modèle de référence du second ordre pour moteur à courant continu



➊ Commande par séquencement de gain, commande LPV



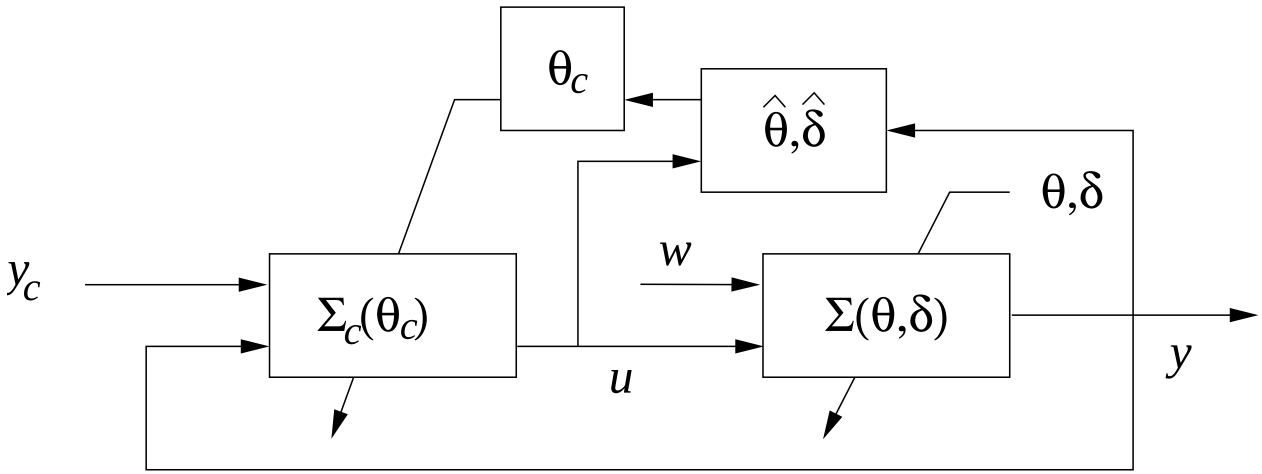
- Jean-Marc BIANNIC - DCSD-ONERA - Toulouse

Ingénieur SupAéro - Thèse en 1996 - HdR en 2010

Jean-Marc.Biannic@onera.fr

- Lundi 16 Mai - 10h-12h & 14h-17h

❷ Estimation des paramètres



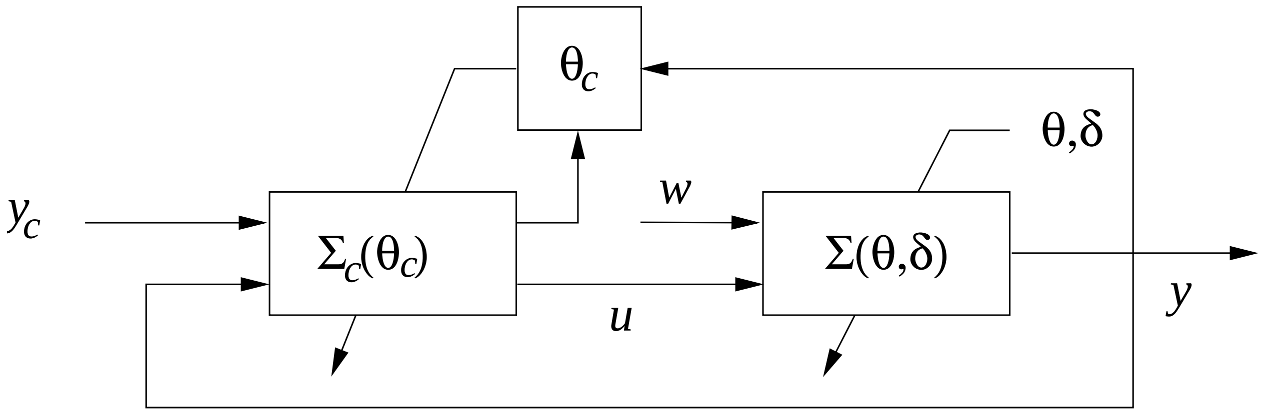
- Denis EFIMOV - IMS - Université de Bordeaux 1

Univ. de St Petersbourg, Russie - Thèses en 2001 et 2006

denis.efimov@u-bordeaux1.fr

- ~~Mardi 17~~ Mercredi 18 Mai - 10h-12h & 14h-17h

❸ Commande adaptative directe - “passivity-based” - PBAC



● Dimitri PEAUCELLE - LAAS-CNRS - Université de Toulouse

Ingénieur Ecole Centrale de Lille - Thèse en 2000 - HdR en 2011

peaucelle@laas.fr

● ~~Mercredi 18~~ Mardi 17 Mai - 10h30-12h30 & 14h-17h

Organisation du cours

❹ Travaux pratiques - LPV et PBAC

- Jean-Marc BIANNIC - DCSD-ONERA - Toulouse
- Dimitri PEAUCELLE - LAAS-CNRS - Université de Toulouse
- Jeudi 19 Mai - 9h-13h