

Automatique

Correcteurs standards et leurs réglages

Hugues Garnier

hugues.garnier@univ-lorraine.fr

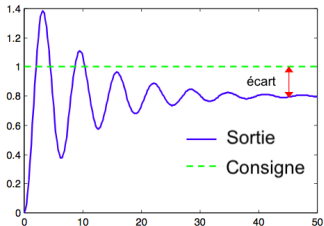
Version du 26 septembre 2023

Plan du cours

- Chapitre 1 - Introduction à l'Automatique et modélisation des systèmes
- Chapitre 2 - Analyse des systèmes
- Chapitre 3 - Stabilité des systèmes
- Chapitre 4 - Systèmes bouclés : stabilité et performances
- **Chapitre 5 - Correcteurs standards et leurs réglages**
 - **Correcteurs TOR**
 - **Correcteurs PID et leurs réglages**
 - **Effets des actions PID**
 - **Correcteurs avancés : cascade, par anticipation, hybride,...**

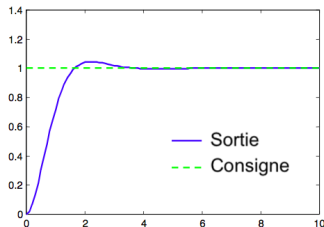
Objectifs d'un contrôle

Système à commander



- Réponse mal amortie
- Ecart avec l'entrée en régime établi

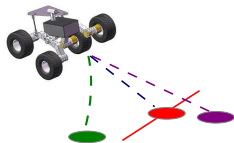
Comportement désiré



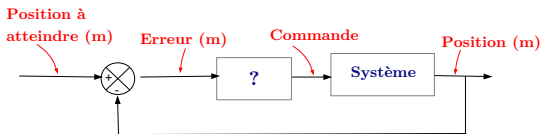
- Réponse bien amortie
- Erreur statique nulle

Pour modifier le comportement du système : insertion d'une boucle de rétro-action et d'un correcteur

Objectifs d'un contrôle



Pas satisfaisant!

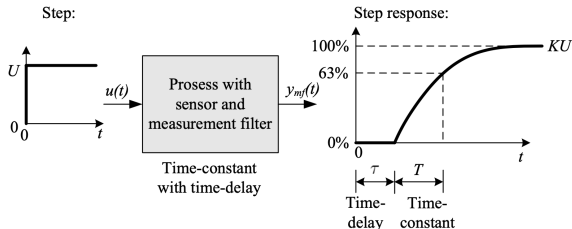


Le correcteur va générer automatiquement le signal de commande à partir du signal d'erreur?

→ Quelle forme choisir pour le correcteur ?

Choix du type de correcteur

Pour les systèmes ayant une réponse indicielle **de type apériodique**



La dynamique du système peut être modélisée par :

$$G(s) = \frac{Ke^{-\tau s}}{1 + Ts}$$

avec

- τ : le retard pur
- T : la constante de temps dominante

Choix du type de correcteur

Pour les systèmes ayant une réponse indicielle **de type aperiodique** décrit par :

$$G(s) = \frac{Ke^{-\tau s}}{1 + Ts}$$

Le type de correcteur peut être choisi en fonction de la valeur de T par rapport à τ à l'aide du tableau suivant

Constante de temps / retard	Correcteur le mieux adapté
$T > 20 \tau$	TOR
$10 \tau \leq T \leq 20 \tau$	P
$5 \tau \leq T \leq 10 \tau$	PI
$2 \tau \leq T \leq 5 \tau$	PID
$T \leq 2 \tau$	Limite des PID Prédicteur de Smith,...

Principe

Un contrôle tout ou rien (TOR) (*bang-bang control* ou *on-off control*) ne peut générer que deux états pour l'actionneur : marche-arrêt. Dans un contrôle TOR ou assimilés (TOR à hystérésis, avec zone morte ou non), la valeur de la sortie n'est prise en compte que lors du franchissement de seuils.

Principales caractéristiques

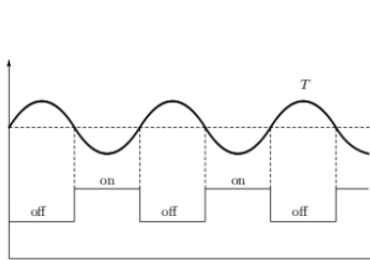
- simple et bon marché
- ne nécessite pas un modèle très précis de la dynamique du système
- malgré sa simplicité, la commande TOR est difficile à analyser à cause de sa non-linéarité

Domaines d'application

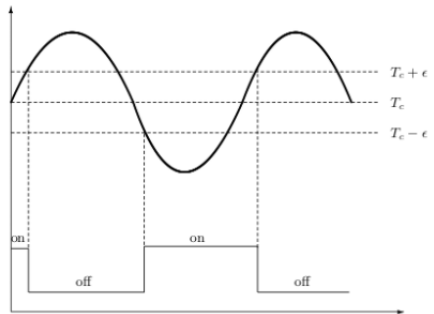
- systèmes ayant une grande inertie où la précision de régulation n'est pas cruciale
- applications de la vie quotidienne : système de chauffage, four, système de climatisation, réfrigérateur,...

Correcteurs TOR

Pour éviter de passer très souvent de "On" à "Off", et inversement, dès que l'erreur change de signe et ainsi réduire le nombre de commutations on/off et par là l'usure de l'organe de commande, on introduit souvent une hystérésis de largeur 2ϵ



Contrôle TOR sans hystérésis



Contrôle TOR avec hystérésis

Rappel : un contrôle est souvent implanté dans un programme

Exemple d'algorithme

Le fonctionnement d'un four piloté par une commande TOR (avec hystérésis) peut être décrit par l'algorithme ci-dessous :

Données : $T(t)$: température du four

Données : T_{\min} (seuil mini); T_{\max} (seuil max)

Résultat : Chauffage : valeur binaire (vrai/faux)

début

tant que le four fonctionne

faire

Lire $T(t)$

si $T(t) > T_{\max}$ **alors**

Chauffage = faux

fin

si $T(t) < T_{\min}$ **alors**

Chauffage = vrai

fin

fin

fin

22/11/2019

Régulation PID : une solution toujours actuelle

Au XVIIIe siècle, les régulateurs à rétroaction mécanique étaient utilisés dans l'industrie pour contrôler les processus. Aujourd'hui, l'efficacité est mesurée dans divers procédés de l'industrie par plusieurs manières. Chaque secteur a ses objectifs, ses indicateurs et ses résultats ; c'est par ce biais que la régulation est effectuée, en cherchant toujours de meilleurs résultats et de l'efficacité dans l'utilisation des ressources.



Principe

Un contrôle PID (*PID control*) exploite la mesure continue de la sortie pour ajuster la commande en exploitant l'une ou l'ensemble des trois actions : proportionnelle, intégrale et dérivée.

Principales caractéristiques

- bon marché
- très apprécié, bien qu'assez rudimentaire
- simple à régler
- offre souvent de bonnes performances avec des propriétés de robustesse que beaucoup d'autres correcteurs leur envient

Domaines d'application

- installations industrielles
- aujourd'hui encore, plus de 80% des régulations de pression, de débit, de température, de vitesse, de position, ... sont réalisées à l'aide de correcteurs PID ou assimilés

Exemple d'algorithme

Le fonctionnement d'un four piloté par une commande proportionnelle peut être décrit par l'algorithme ci-dessous :

Données : T_c : température de consigne du four

Données : $T(t)$: température du four

Données : K (gain du correcteur)

Résultat : $\text{Chauffage}(t)$: commande du four

début

tant que le four fonctionne

faire

Lire $T(t)$

$\text{Chauffage}(t) = K (T_c - T(t))$

fin



Understanding PID Control, Part 1: What is PID control?



Figure: www.youtube.com/watch?v=wkfEZmsQqiA&list=PLn8PRpmsu08pQBgjxYFXSsODEF3Jqmm-y

Voir aussi Suivi de trajectoire: exemple d'une voiture autonome :
youtu.be/4Y7zG48uHRo

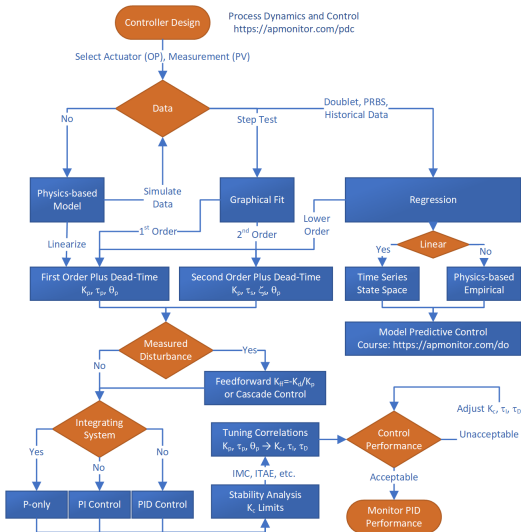
Correcteurs PID

Le choix du type de correcteur est généralement dicté par sa faculté à corriger les lacunes du système asservi sans correcteur. Le tableau ci-dessous constitue un premier guide au choix du correcteur PID en fonction du modèle du comportement dominant du système.

Modèle du comportement dominant	Type de correcteur PID
$G(s) = \frac{K}{s}$	P
$G(s) = \frac{K}{1 + Ts}$	PI
$G(s) = \frac{K}{s(1 + Ts)}$	P ou PD
$G(s) = \frac{Ke^{-\tau s}}{1 + Ts}$	PI ou PID ($2 \leq \frac{T}{\tau} \leq 10$)
$G(s) = \frac{K}{(1 + T_1s)(1 + T_2s)}$	PID

Table: Guide au choix du correcteur PID en fonction du modèle du comportement dominant du système. Ce guide peut être affiné en fonction du niveau de performances attendues.

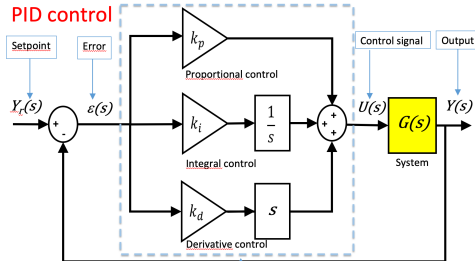
Un guide au choix **plus complet** du type de correcteur (de John Hedengren)



Correcteurs PID

Ils sont caractérisés par 3 actions possibles :

- Action **P**roportionnelle
- Action **I**ntégrale
- Action **D**érivée



Réglage de PID - Compromis stabilité/rapidité

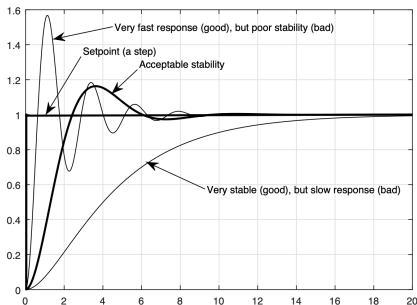
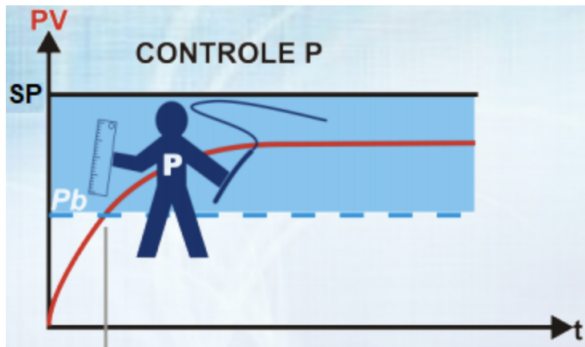


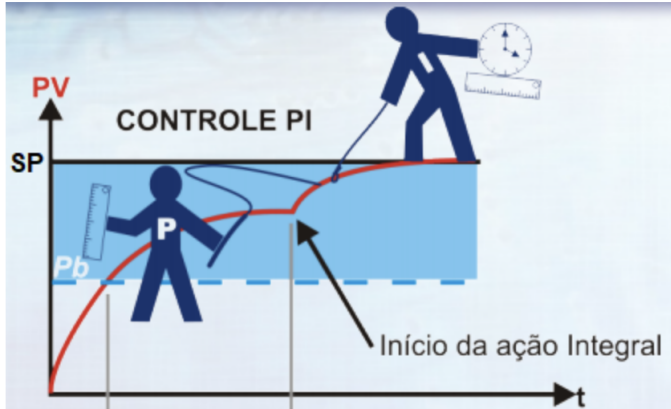
Figure 13.2: The typical compromise between good stability as fastness of a control systems

Il faudra souvent faire un compromis pour le réglage du correcteur PID entre stabilité (via le dépassement) et rapidité (via le temps de réponse) de la réponse du système bouclé

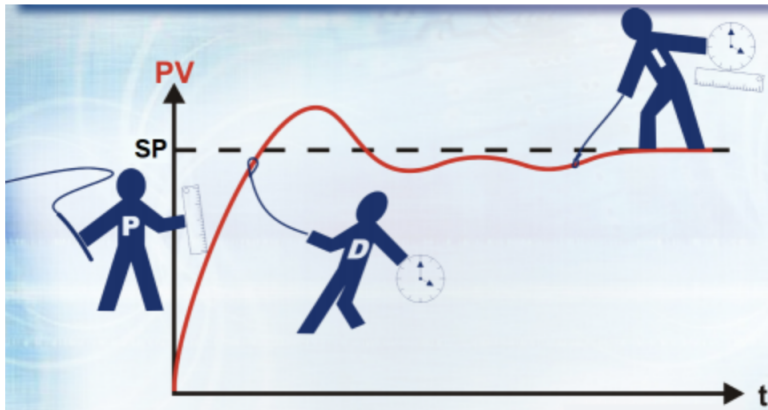
Effet de l'action P



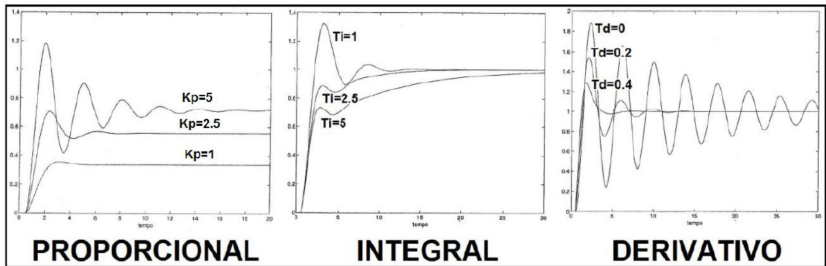
Effets des actions combinées PI



Effets des actions combinées PID

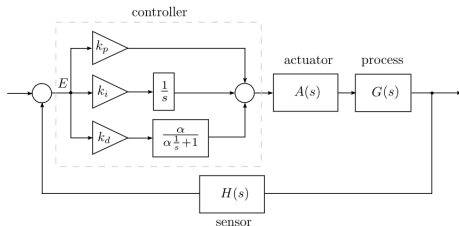


Effet des actions PID sur la réponse indicielle



Réglage des correcteurs PID

Quels sont les effets des actions du correcteur PID sur la réponse du système bouclé?



PID gain	Overshoot	Settling time	Steady-state error
Increasing k_p	Increases	Minimal impact	Decreases
Increasing k_i	Increases	Increases	Zero error
Increasing k_d	Decreases	Decreases	No impact

Voir transparents sur [Effects of PID terms](#)

$$C(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right)$$

Comment déterminer les 3 paramètres : K_p , T_i et T_d du correcteur PID ?

Il n'existe pas de méthode universelle de réglage !!

voir vidéo Brian Douglas

A PID Tuning Guide — Understanding PID Control, Part 4

www.youtube.com/watch?v=sFOEsA0Irs&list=PLn8PRpmsu08pQBgjxYFXSsODEF3Jqmm-y&index=5

On peut exploiter l'une des méthodes suivantes :

- Méthode de réglage (*totale*) empirique
- Méthodes de réglage semi-empirique (à base de modèle)
- Méthode du modèle de référence (à base de modèle)
- Méthode par minimisation d'un critère (à base de modèle)
- ...

Réglage des correcteurs

1. Méthode empirique

Principe : procédure par essais/erreurs pour déterminer les 3 paramètres : K_p , T_i et T_d du correcteur suivant :

$$C(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right)$$

Avantage : pas besoin de modèle du système

Inconvénient : long et fastidieux, essais sur site nécessaires

Procédure itérative d'après l'observation de la réponse indicielle du système bouclé

① Action proportionnelle

Fixer $T_d = 0$ et $T_i = \infty$.

Appliquer un échelon sur la consigne.

Choisir K_p faible puis l'augmenter progressivement tant que les oscillations et dépassements restent tolérables.

② Action dérivée

Augmenter T_d jusqu'à ce que la réponse soit suffisamment amortie.

Réajuster K_p si nécessaire.

③ Action intégrale

Diminuer T_i jusqu'à ce que la sortie rattrape la consigne de façon suffisamment rapide.

Si la réponse oscille de trop, diminuer K_p ou augmenter T_d .

Réglage des correcteurs

2. Méthode de Ziegler-Nichols (si objectif du contrôle : régulation)

- 1 Identifier un modèle du 1er ordre retardé à partir de la réponse indicielle en boucle ouverte

$$G(s) = \frac{Ke^{-\tau s}}{1 + Ts}$$

- 2 Exploiter le tableau proposé par Ziegler-Nichols pour le réglage des actions d'un correcteur PID de forme idéale

$$C(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + \frac{T_d s}{1 + \frac{T_d}{M} s} \right) \quad M \text{ entier } (3 \geq M \geq 20)$$

Controller type	K_p	T_i	T_d
P	$\frac{T}{K\tau}$		
PI	$0.9 \frac{T}{K\tau}$	3τ	
PID	$1.2 \frac{T}{K\tau}$	2τ	0.5τ

3. Méthode de Chien-Redwick-Hrones (si objectif : asservissement)

- 1 Identifier un modèle du 1er ordre retardé à partir de la réponse indicielle en boucle ouverte

$$G(s) = \frac{Ke^{-\tau s}}{1 + Ts}$$

- 2 Exploiter le tableau proposé par Chien-Redwick-Hrones pour le réglage des actions d'un correcteur PID de forme idéale

$$C(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + \frac{T_d s}{1 + \frac{T_d}{M} s} \right) \quad M \text{ entier } (3 \geq M \geq 20)$$

Controller type	K_p	T_i	T_d
P	$0.3 \frac{T}{\tau}$		
PI	$0.35 \frac{T}{\tau}$	1.2T	
PID	$0.6 \frac{T}{\tau}$	T	0.5T

4. Méthode du modèle de référence (à base de modèle)

Principe

Imposer que la fonction de transfert en boucle fermée tende vers une fonction de transfert de référence (ou désirée) $F_{ref}(s)$

- 1 Déterminer un modèle $G(s)$ par identification ou modélisation
- 2 Déterminer la fonction de transfert du système en boucle fermée

$$F_{BF}(s) = \frac{C(s)G(s)}{1 + C(s)G(s)}$$

- 3 Déterminer les paramètres du correcteur pour que $F_{BF}(s) = F_{ref}(s)$:

$$C(s) = \frac{F_{ref}(s)}{G(s)(1 - F_{ref}(s))}$$

Remarques

- Choix trop contraignant de $F_{ref}(s)$ peut conduire à un correcteur non réalisable !
- Dynamique trop rapide de $F_{ref}(s)$ entraîne des commandes de trop grandes amplitudes, dommageables pour le matériel

Réglage des correcteurs

4. Méthode du modèle de référence (ou de placement des pôles)

a) Comportement désiré du système bouclé = modèle du 1er ordre

Fonction de transfert du processus :

$$G(s) = \frac{K}{1 + Ts}$$

Fonction de transfert désirée en boucle fermée :

$$F_{ref}(s) = \frac{1}{1 + T_{ref}s}$$

Correcteur :

$$C(s) = \frac{F_{ref}(s)}{G(s)(1 - F_{ref}(s))} = \frac{T}{KT_{ref}} \frac{1 + Ts}{Ts}$$

⇒ Correcteur PI de fonction de transfert $K_p \frac{1 + T_i s}{T_i s}$

avec $K_p = \frac{T}{KT_{ref}}$ et $T_i = T$

Réglage des correcteurs

4. Méthode du modèle de référence (ou de placement des pôles)

b) Comportement désiré du système bouclé = modèle du 2e ordre

Cahier des charges : la réponse indicielle du système bouclé doit satisfaire à des contraintes exprimées dans le domaine temporel.

Step response requirement depend on the system

Linear, low pass filter-like, 2nd order, no finite zeros

$$G(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}$$

ω_n = natural frequency
 ζ = damping ratio



4. Méthode du modèle de référence (ou de placement des pôles)

b) Comportement désiré du système bouclé = modèle du 2e ordre

Exemple de spécifications : erreur statique nulle, un premier dépassement $D_1 = 0.1$ et un temps de réponse à 5% $t_r^{5\%} = 5$ s

- Fonction de transfert désirée en boucle fermée (2e ordre standard) :

$$F_{ref}(s) = \frac{1}{\frac{s^2}{\omega_0^2} + \frac{2z}{\omega_0}s + 1}$$

- Gain statique = 1 \Rightarrow erreur statique = 0

- Dépassement souhaité : $D_1 = e^{\frac{-\pi z}{\sqrt{1-z^2}}} \Rightarrow z = \sqrt{\frac{(\ln(D_1))^2}{\pi^2 + (\ln(D_1))^2}}$

- Caractéristique souhaitée. Exemple : $t_r^{5\%} \approx \frac{3}{\omega_0 z} \Rightarrow \omega_0 = \frac{3}{t_r^{5\%} z}$

\rightarrow Correcteur calculé pour obtenir z et ω_0

- Remarque. Imposer les valeurs de z et ω_0 , revient à placer/imposer les pôles de la fonction de transfert en boucle fermée.

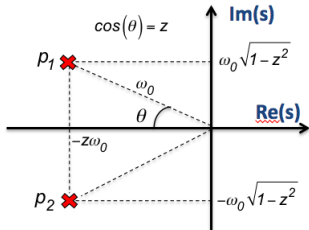
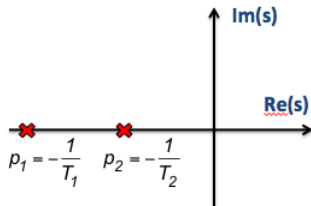
Diagramme des pôles d'un système du 2e ordre - Rappels

Imposer les valeurs de z et ω_0 , revient à placer/imposer les pôles de la fonction de transfert en boucle fermée \Rightarrow méthode de placement de pôles

$$G(s) = \frac{K\omega_0^2}{s^2 + 2z\omega_0s + \omega_0^2} = \frac{K}{\frac{s^2}{\omega_0^2} + \frac{2z}{\omega_0}s + 1}$$

si $z \geq 1$, $p_{1,2} = -z\omega_0 \pm \omega_0\sqrt{1-z^2}$

si $z < 1$, $p_{1,2} = -z\omega_0 \pm j\omega_0\sqrt{1-z^2}$



- Si les pôles se déplacent verticalement

$$T_r^{5\%} \approx \frac{3}{\omega_0 z} \text{ reste constant}$$

- Si les pôles se déplacent horizontalement

$$T_{D1} = \frac{\pi}{\omega_0 \sqrt{1-z^2}} \text{ reste constant}$$

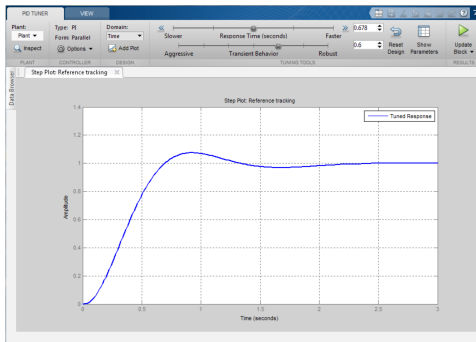
Réglage des correcteurs

5. Méthode de minimisation d'un critère

- On définit un critère pour donner une mesure objective de l'évolution de l'erreur en réponse à un échelon de consigne. Un exemple de critère est :

$$J(K_p, T_i, T_d) = \int_0^{+\infty} \varepsilon^2(t) dt$$

- Les paramètres K_p , T_i et T_d du correcteur sont ceux qui minimisent le critère choisi (utilisation d'un algorithme d'optimisation)
- Voir, par exemple, l'outil **PID Tuner**, disponible dans Matlab et Simulink (exploitation lors du TP de régulation de température)



6. Autres méthodes de réglage

- Autres méthodes de réglage empirique et semi-empirique
- Méthodes de réglage par placement de pôles
- Méthodes de réglage dans le domaine fréquentiel
- ...

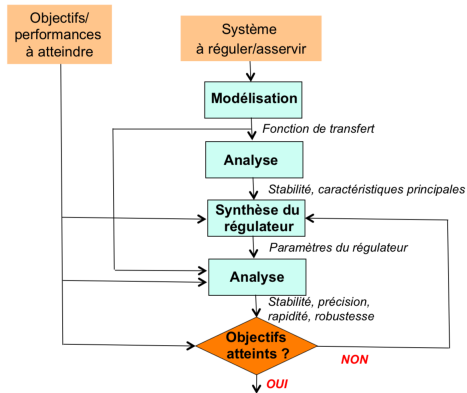
4. Autres méthodes de contrôle/commande - Voir transparents **More advanced PID based control**

- Commande par anticipation (*feedforward control*)
- Commande cascade (*cascade control*)
- Commande hybride (*hybrid control*)
- Correcteur de Smith (pour les systèmes à retard important)
- Commande prédictive (*predictive control*)
- Commande par retour d'état (pour les systèmes multivariables et/ou comportant plusieurs pôles instables)
- ...

Rappel des objectifs du cours :

Maîtrise des outils pour modéliser, analyser et contrôler un système dynamique

Etapes de conception d'une commande en boucle fermée



Pour aller plus loin et réviser

Télécharger sur votre tablette ou téléphone portable l'application développée par la société canadienne Quanser: *Experience controls*
<https://www.quanser.com/products/experience-controls-app/>

Parcourez les résumés de cours et testez vos connaissances avec les quiz à la fin de chaque chapitre



PRODUCTS ▾

COURSEWARE & RESOURCES ▾

SUPPORT ▾

COMMUNITY ▾

BLOG

ABOUT ▾



Experience Controls App

| CONTROL SYSTEMS

Free Mobile Control Systems Textbook

The Experience Controls app is a unique interactive mobile textbook introducing students to control systems fundamentals in an engaging way, through accessible language, real-time dynamic simulations, and self-directed learning. The accompanying instructor resources allow educators to easily implement Experience Controls into any new or existing control systems course.

Experience Controls can be downloaded for free on the [App Store](#) and [Google Play](#).

[Learn More ▾](#)

[Instructor Resources](#)

[Get the Newsletter](#)



SEE IT IN ACTION