

Avant-propos

La notion de régulation est basée essentiellement sur le principe de rétro-action : se sont les variations relatives des variables observées par rapport aux variables de consigne qui provoquent l'évolution des variables de commande.

La construction du système de régulation d'un processus nécessite une analyse préalable de celui-ci et une modélisation de son comportement, celle-ci pouvant être éventuellement très simple. Dans tous les cas les modélisations sur lesquelles sont basées toutes les synthèses de régulateurs ne sont pas parfaites, ceux-ci doivent posséder l'effet d'être le moins sensible aux erreurs de modélisation et assurer le bon fonctionnement du processus même en présence d'erreurs ou de perturbations.

Ce volume est consacré à l'analyse et à la synthèse de systèmes asservis à régulations continues, on dit parfois régulations analogiques même si la mise en œuvre de système de commande proposé s'effectue par l'intermédiaire d'un calculateur numérique.

Ce présent volume constitue un ouvrage de base où sont présentés l'ensemble de connaissances nécessaires aux étudiants de l'ISET et à toute personne désireuse de comprendre ou mettre en œuvre les techniques de régulation.

Table des matières

Chapitre 1 : Modélisation	4
I. Vocabulaire	4
II. Modèle de système bouclé	4
II.1. Modélisation	4
 Chapitre 2 : Méthodes d'identification classiques des systèmes linéaires	7
I. Introduction	7
II. Méthodes d'identification	7
II.1. Systèmes de 1 ^{er} ordre	7
II.2. Systèmes de second ordre	9
a. Second ordre oscillant	9
b. Systèmes non oscillants	11
b.1. Modèle de Strejc	11
b.2. Modèle de Broïda	12
b.3. Modèle de Ziegler & Nichols	13
 Chapitre 3 : Synthèse de régulateurs	16
I. Régulation T.O.R. (Tout Ou Rien)	16
II. Régulation par PID	19
II.1. Introduction	19
II.2. Influence du gain proportionnel G_r	19
II.3. Action dérivée	19
II.4. Action intégrale	19
II.5. l'action Proportionnel Intégral Dérivée PID	20
II.6. Méthodes de synthèse du régulateur PID	20
a. Méthode d'approximations successives	20
b. Méthode de Broïda	22
c. Méthodes de Ziegler & Nichols	23

c.1. Méthode de Ziegler &Nichols en boucle ouverte.....	23
c.2. Méthode de Ziegler &Nichols en boucle fermée.....	25
d. Méthodes de Chien-Hrones-Reswick	26
Chapitre 4 : Schéma TI.....	27
Chapitre 5 : La régulation cascade.....	31
I. Principe de régulation cascade.....	31
II. Mise au point de la régulation cascade	34
II.1. Choix du sens d'action des régulateurs	34
a. Modemanuel,mode automatique du régulateur	34
b. Sens directe et sens inverse du régulateur	34
II.2. Réglage de la boucle interne (régulateur asservi).....	36
II.3. Passage manuel/automatique/cascade sans à coups.....	36
II.4. Réglage de la boucle externe (régulateur pilote)	36
III. Résultats comparatifs.....	37
Quelques indications sur les régulateurs industriels	38
Bibliographie.....	39

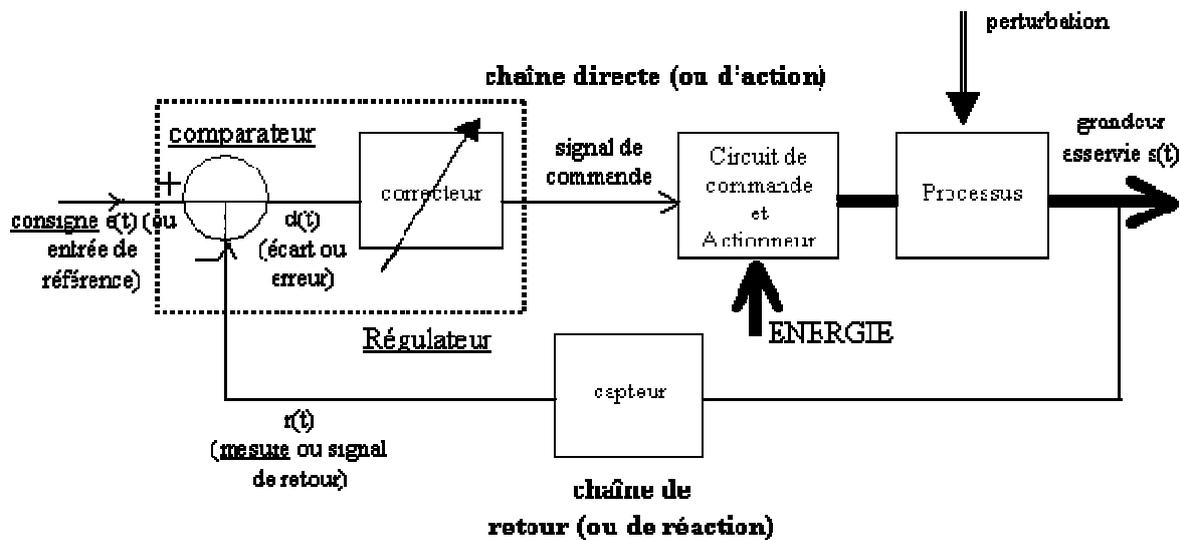
Chapitre 1

Modélisation

I. Vocabulaire

- Les régulations : Elles consistent à maintenir une grandeur physique à la valeur fixée par l'information traduisant la tâche à accomplir le talon.
- Les asservissements : Elles consistent à faire suivre une loi non fixée à l'avance à une grandeur physique. L'information traduisant la tâche à accomplir est la consigne. On parle de système fonctionnant en poursuite.

II. Modèle de système bouclé



II.1. Modélisation

Nous intéressons ici aux modèles mathématiques qui représentent les relations entre les entrées et les sorties du processus (système dynamique) par des équations.

On distingue trois sortes de modèles :

- Les modèles de connaissances : sont construits à partir d'une analyse physique, chimique, biologique (suivant le type du processus) en appliquant les trois lois générales.
- Les modèles boîtes noires : systèmes mal connus, les modèles sont construits à partir de mesures entrées-sorties.
- Les modèles boîtes grises : Lorsque les connaissances exprimables sous forme d'équations sont disponibles mais insuffisantes. On a recours aux mesures.

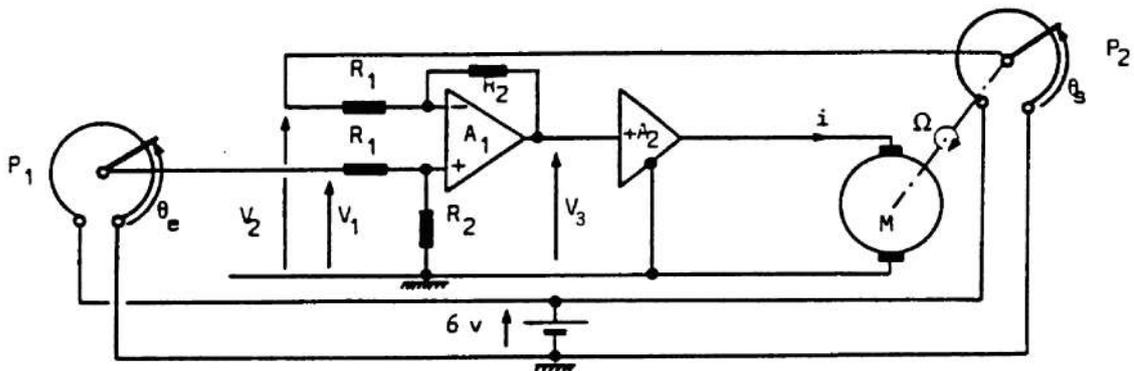
Exemple d'asservissement de position

Une chaîne d'asservissement de position comporte les éléments suivants :

- deux potentiomètres P1 et P2 alimentés en 6V et ayant un angle de rotation maximal de 6 radians

- un moteur de résistance $R_m = 25 \Omega$, d'inductance $L_m = 3,9 \text{ mH}$ et de constante de couple $K = 0,2$
- un comparateur A1 à AOP avec $R_1 = 1 \text{ k}\Omega$ et $R_2 = 100 \text{ k}\Omega$
- un amplificateur de puissance A2 d'amplification en tension à vide de 1 et de résistance de sortie $R_s = 5 \Omega$
- des parties tournantes dont l'inertie totale ramenée sur l'arbre du moteur vaut $J = 10^{-4} \text{ kgm}^2$ et de coefficient de frottement visqueux $f=1$.

Donner le schéma fonctionnel du système asservi



Mise en équation de :

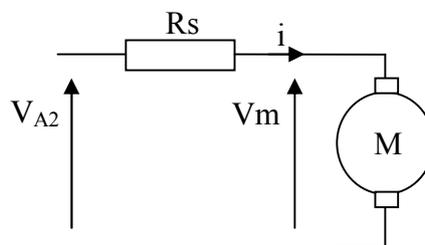
- potentiomètre P1 : $V_1(t) = k_e \theta_e(t) V_1(p) = k_e \theta_e(p)$ avec $k_e = \frac{6}{6} = 1 \text{ V/rad}$

- l'étage A.OP A1 :

$$V_+ = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_1 ; V_- = \frac{\frac{V_2 + V_3}{R_1 + R_2}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_2 + \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_3$$

$$V_+ = V_- \Rightarrow R_2 V_1 = R_2 V_2 + R_1 V_3 \Rightarrow V_3 = \frac{R_2}{R_1} (V_1 - V_2) \Rightarrow V_3(p) = \frac{R_2}{R_1} (V_1(p) - V_2(p))$$

- l'amplificateur de puissance A2 :



$$V_m = V_{A2} - R_s i = V_3 - R_s i \Rightarrow V_M(p) = V_3(p) - R_s i(p)$$

- moteur

$$V_m = R_m i + L_m \frac{di}{dt} + e \Rightarrow V_m(p) = (R_m + L_m p) I(p) + E(p)$$

$$\Rightarrow I(p) = \frac{V_m(p) - E(p)}{R_m + L_m p}$$

- $e(t) = K\omega(t) \Rightarrow E(p) = K\Omega(p)$

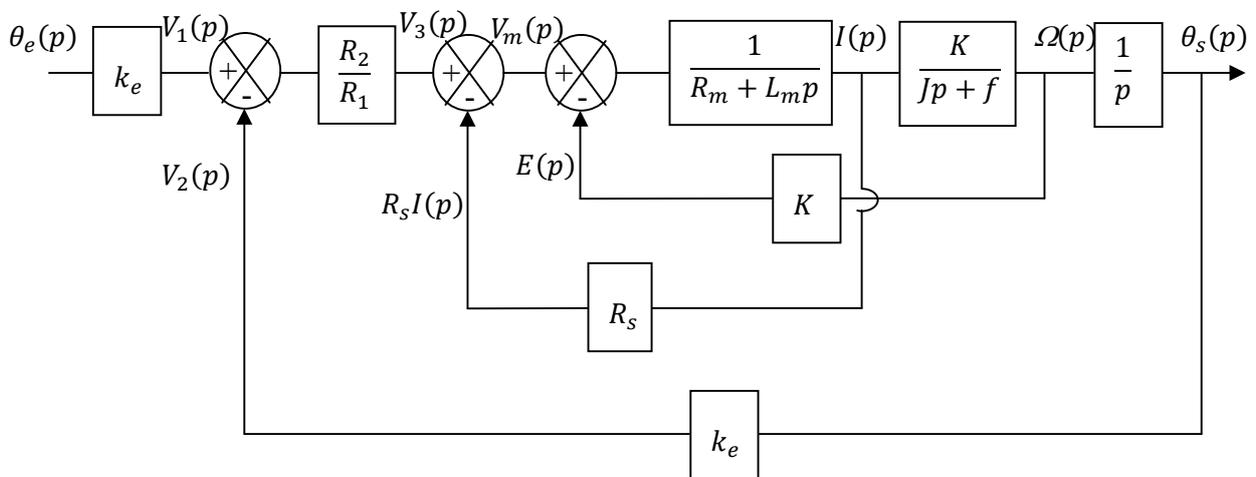
- $\Gamma_m(t) = Ki(t) = J \frac{d\omega(t)}{dt} + f\omega(t) \Rightarrow KI(p) = Jp\Omega(p) + f\Omega(p)$

$$\Rightarrow \Omega(p) = \frac{K}{Jp + f} I(p)$$

- $\frac{d\theta_s(t)}{dt} = \omega(t) \Rightarrow \theta_s(p) = \frac{\Omega(p)}{p}$

- potentiomètre P2

$$V_2(p) = k_e \theta_s(p)$$



Chapitre 2

Méthodes d'identification classiques des systèmes linéaires

I. Introduction

L'établissement du modèle de connaissances est utilisé pour des systèmes peu complexes et parfaitement connus. Alors que généralement les systèmes sont d'une grande complexité qu'on ne peut pas facilement mettre en équation sous forme analytique. De plus le modèle de connaissances reste approximatif car on ignore d'autres éléments importants qui entrent dans la dynamique du système, qu'on peut citer la linéarité, comportement en fréquences élevées, effet de la température, humidité, usure etc... Pour cela on utilise les essais expérimentaux pour déterminer un modèle approché valable uniquement dans la zone de fonctionnement du procédé étudié.

L'automaticien préférera un modèle de commande ou modèle de conduite qui l'utilisera pour simuler puis commander le processus.

II. Méthodes d'identification

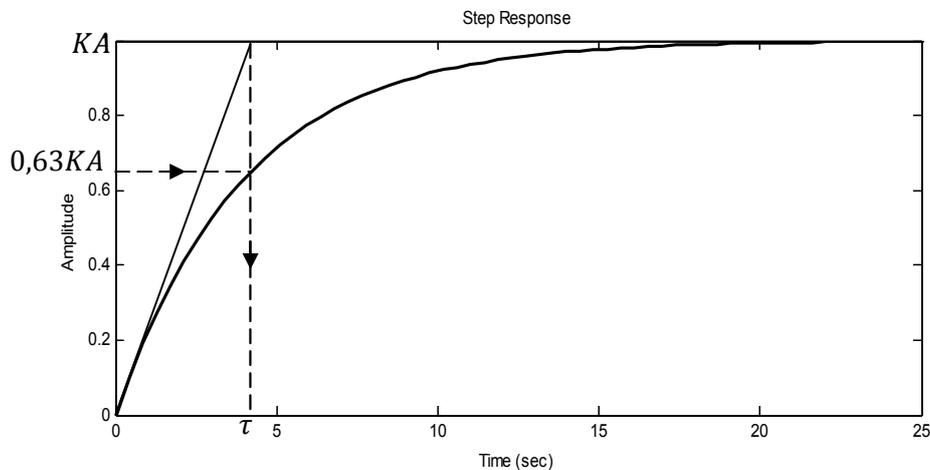
On applique un échelon $A.u(t)$ au système à étudier et on analyse sa réponse.

II.1. Systèmes de 1^{er} ordre

a.
$$H(p) = \frac{K}{1+\tau p}$$

$$S(p) = H(p).E(p) = \frac{KA}{p(1+\tau p)}, s(t) = KA \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) u(t)$$

$$s(0) = 0, s(\infty) = KA, \dot{s}(0) = \frac{KA}{\tau}$$

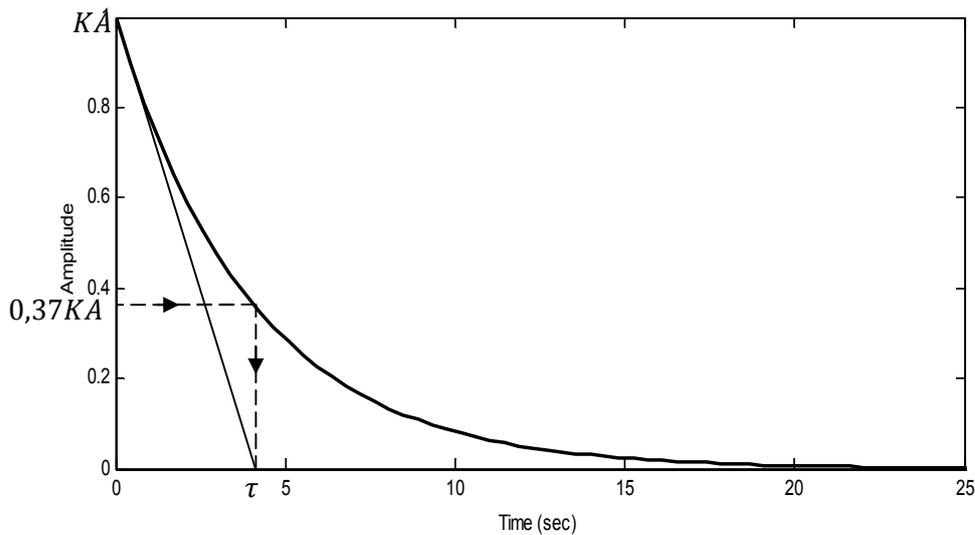


Identification : l'asymptote à l' ∞ est $KA \rightarrow K = \frac{s(\infty)}{A}$; τ est le temps mis pour atteindre 0,63 $s(\infty)$.

b.
$$H(p) = \frac{K\tau p}{1+\tau p}$$

$$S(p) = H(p).E(p) = \frac{KA\tau}{1+\tau p}, s(t) = KAe^{-\frac{t}{\tau}}u(t)$$

$$s(0) = KA, s(\infty) = 0, \dot{s}(0) = -\frac{KA}{\tau}$$



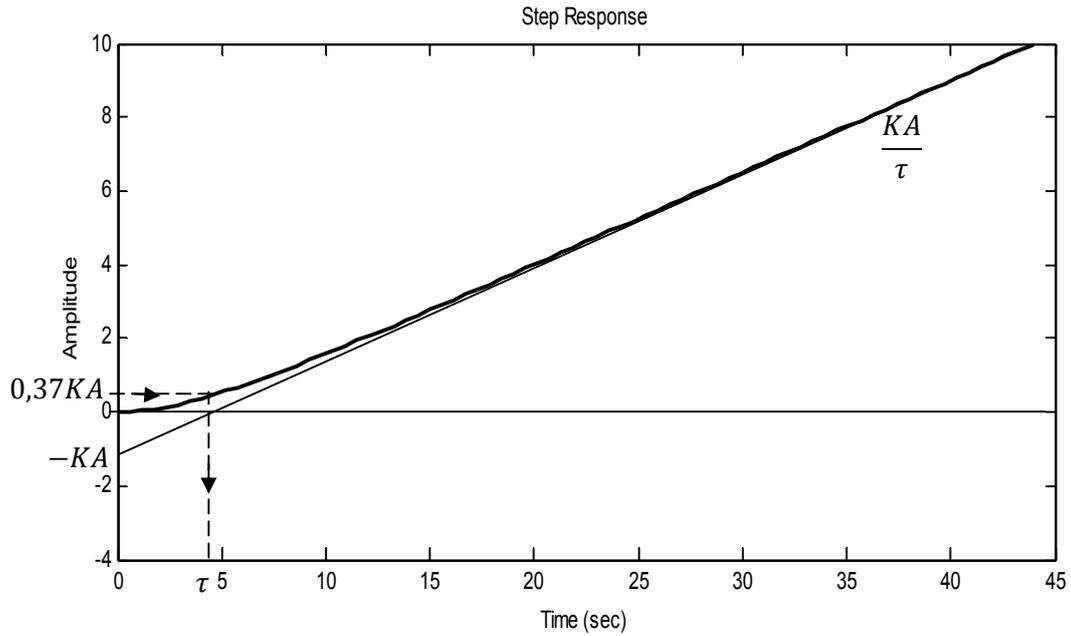
Identification : le gain K est donné à partir de $t = 0$ et τ est le temps correspondant 0,37 $s(0)$

c. Intégrateur associé au premier ordre

Forme canonique :
$$H(p) = \frac{KA}{\tau p(1+\tau p)}$$

$$S(p) = H(p).E(p) = \frac{KA}{\tau p^2(1+\tau p)}, s(t) = KA\left(\frac{t}{\tau} - 1 + e^{-\frac{t}{\tau}}\right)u(t)$$

$$s(0) = 0, \dot{s}(0) = 0, \text{ asymptote } s_{asym} = KA\left(\frac{t}{\tau} - 1\right)$$



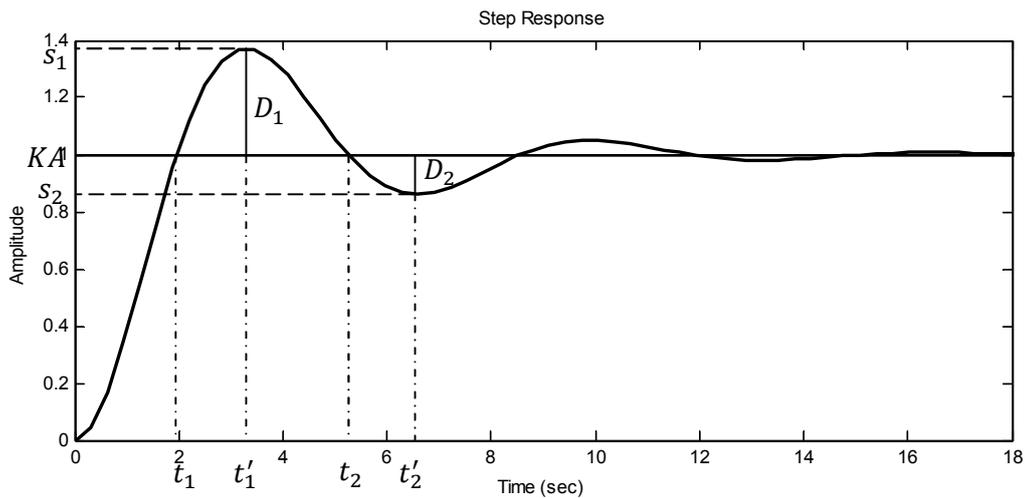
Identification : l'intersection de l'asymptote à l' ∞ avec l'axe des amplitudes donne KA , son intersection avec l'axe du temps correspond à la valeur de τ ; $s(\tau) = e^{-1}KA = 0,37KA$

II.2. Systèmes de second ordre

a. **Second ordre oscillant** : coefficient d'amortissement $0 < m < 1$

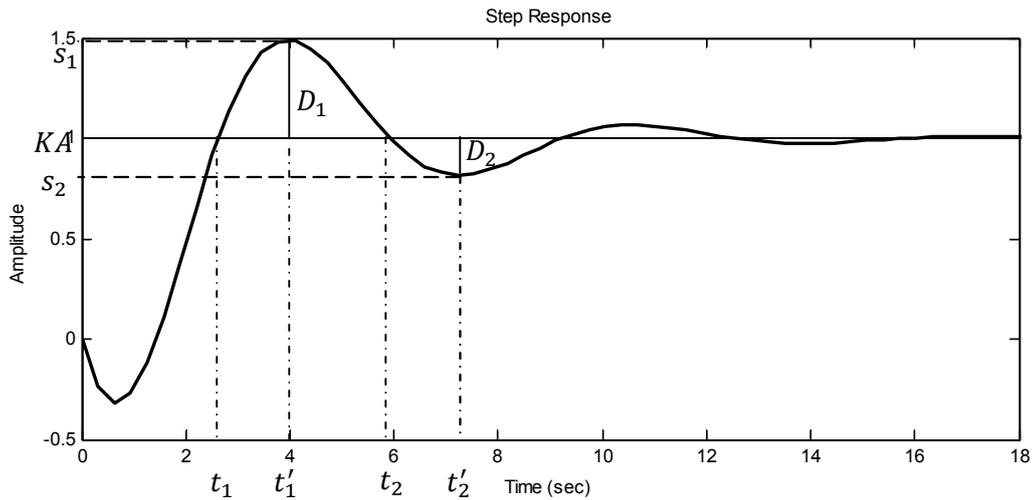
- 1^{ère} forme canonique

$$H_1(p) = \frac{K}{1 + 2m \frac{p}{\omega_0} + \frac{p^2}{\omega_0^2}} \text{ avec } 0 < m < 1$$



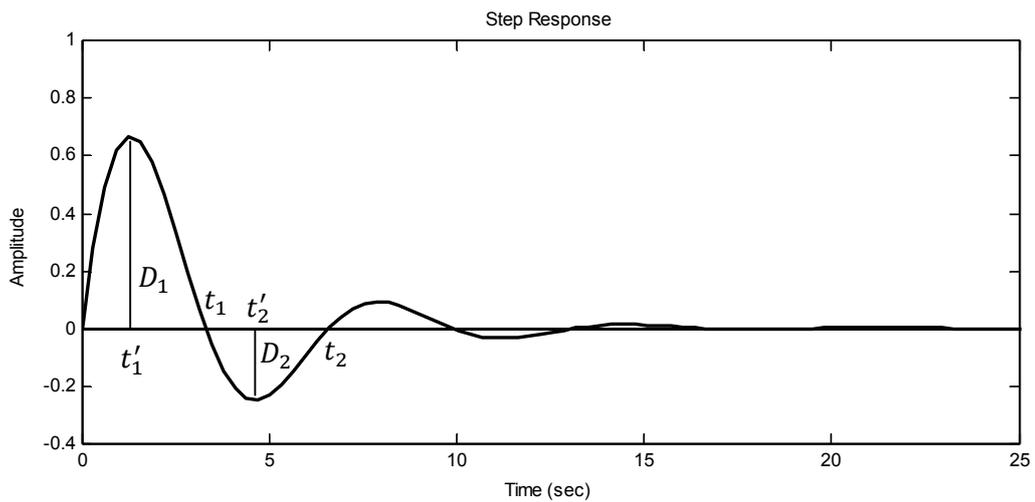
- 2^{ème} forme canonique

$$H_2(p) = \left(1 - \frac{p}{\omega_0}\right) \frac{K}{1 + 2m \frac{p}{\omega_0} + \frac{p^2}{\omega_0^2}}$$



3^{ème} forme canonique

$$H_3(p) = \frac{p}{\omega_0} \frac{K}{\left(1 + 2m \frac{p}{\omega_0} + \frac{p^2}{\omega_0^2}\right)}$$



Identification :

Considérons les deux premiers extrema s_1 et s_2 aux dates t_1' et t_2' .

$$\frac{D_2}{D_1} = \frac{s_2 - s_\infty}{s_1 - s_\infty} = e^{-\frac{m\pi}{\sqrt{1-m^2}}} \text{ avec } s_\infty = KA \text{ pour } H_1 \text{ et } H_2 \text{ et } s(0) = 0 \text{ pour } H_3.$$

$$\omega_0 = \frac{\pi}{\sqrt{1-m^2}} = \frac{1}{t_2' - t_1'} = \frac{1}{t_2 - t_1}$$

KA est l'ordonnée de l'asymptote pour H_1 et H_2 . Pour H_3 , il faut calculer un point de :

$$s_3(t) = \frac{KA}{\sqrt{1-m^2}} e^{-m\omega_0 t} \sin\left(\omega_0 \sqrt{1-m^2} t\right)$$

Pour les valeurs de m proche de 1, le rapport $\frac{D_1}{D_2}$ ne peut être évalué précisément.

Pour H_1 et H_2 , il est possible de considérer le 1^{er} dépassement :

$$\frac{s_1 - s_\infty}{s_\infty} = e^{-\frac{m\pi}{\sqrt{1-m^2}}}$$

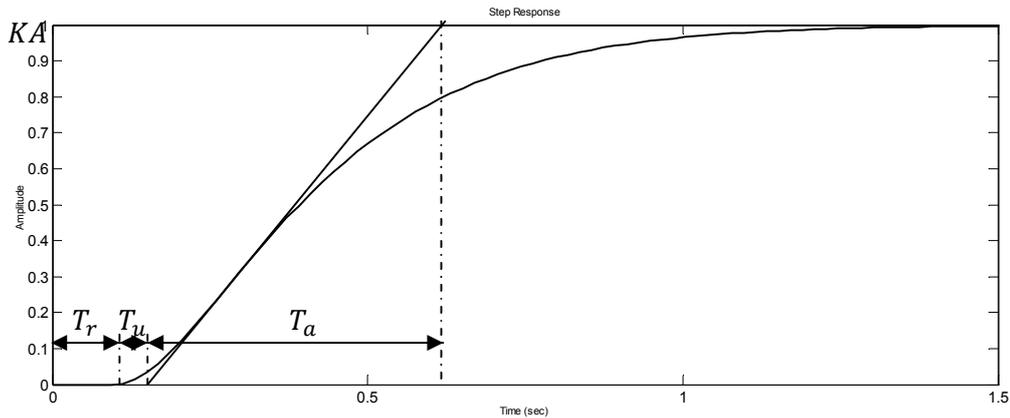
b. Systèmes non oscillants :

b.1. Modèle de Strejc

Il ne s'applique qu'aux systèmes à réponse apériodique, d'asymptote horizontale, ne comportant qu'un seul point d'inflexion.

On cherche à mettre la fonction de transfert en boucle ouverte sous forme :

$$H(p) = \frac{K e^{-rp}}{(1+\tau p)^n} \text{ avec : } n > 0 \text{ et } \begin{cases} r : \text{retard pur} \\ \tau : \text{constante de temps multiple} \end{cases}$$



Identification :

On détermine n et τ à l'aide du tableau suivant :

n	1	2	3	4	5	6
T_u/T_a	0	0,104	0,218	0,319	0,410	0,493
T_a/τ	1	2,718	3,695	4,463	5,119	5,699

Si on obtient une valeur exacte de n , on a alors $r = T_r$. Dans le cas contraire, on prend la valeur de n entière immédiatement inférieure et on calcule (à l'aide du tableau) la valeur de T_u fictive et on fait : $r = T_r(T_{ur\acute{e}el} - T_{ufictif})$.

Exemple : on cherche à identifier le système dont la réponse indicielle unitaire est donnée ci-dessus par le modèle de Strejc.

Le système est à réponse apériodique, d'asymptote horizontale et ne comporte qu'un point d'inflexion (à $t = 0,3$ s). Il répond au modèle de Strejc résultant de mesures : $Tr=0,111s$;

$Tu=0,048s$; $Ta=0,469s$. On en déduit $\frac{Tu}{Ta} = \frac{0,048}{0,469} = 0,102 \approx 0,104$ ce qui donne $n=2$. Dans ce

cas $r=Tr = 0,111s$ et $\tau = \frac{Ta}{2,718} = \frac{0,469}{2,718} = 0,173s$

$$s_{\infty} = 1 = KA = K$$

D'où :

$$H(p) = \frac{e^{-0,111p}}{(1+0,173p)^2}$$

b.2. Modèle de Broïda

C'est la forme simplifiée de Strejc avec $n=1$

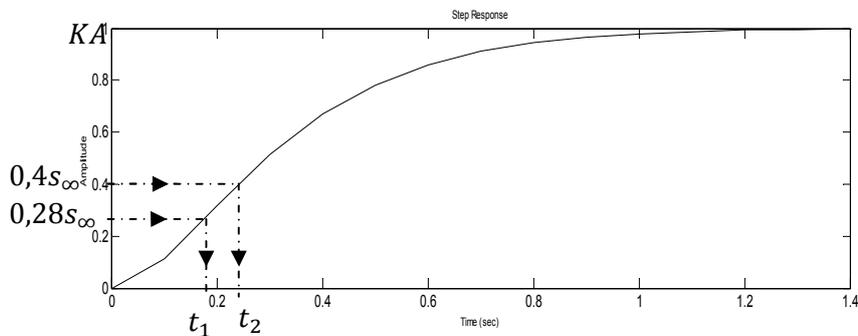
$$H(p) = \frac{Ke^{-rp}}{1 + \tau p}$$

On mesure les t_1 et t_2 correspondant à $s(t_1) = 0,28s_{\infty}$ et $s(t_2) = 0,4s_{\infty}$.

A partir des temps t_1 et t_2 , la méthode de Broïda préconise le choix des constantes :

$$\tau = 5,5(t_2 - t_1)$$

$$r = 2,8t_1 - 1,8t_2$$



Le gain K est calculé partir de $s_{\infty} = KA$.

Exemple : Déterminer le modèle Broïda du système dont la réponse indicielle unitaire est donnée par ci-dessus.

$$KA = 1 \Rightarrow K=1$$

On relève les valeurs $t_1=0,181s$; $t_2=0,244s$.

$$\text{On en déduit } \tau = 5,5(0,244 - 0,181) = 0,347s$$

$$\text{etr} = 2,8 * 0,181 - 1,8 * 0,244 = 0,068s$$

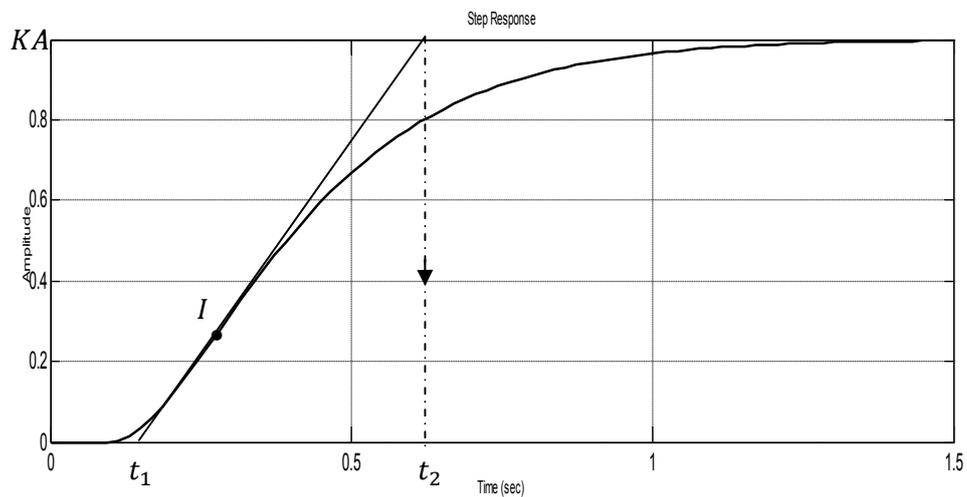
D'où :

$$H(p) = \frac{e^{-0,068p}}{1 + 0,347p}$$

b.3. Modèle de Ziegler Nichols

- Système stable

$$H(p) = \frac{Ke^{-rp}}{1 + \tau p}$$

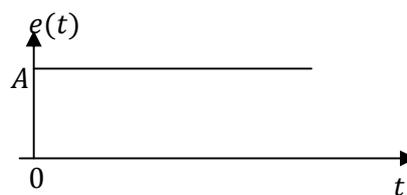


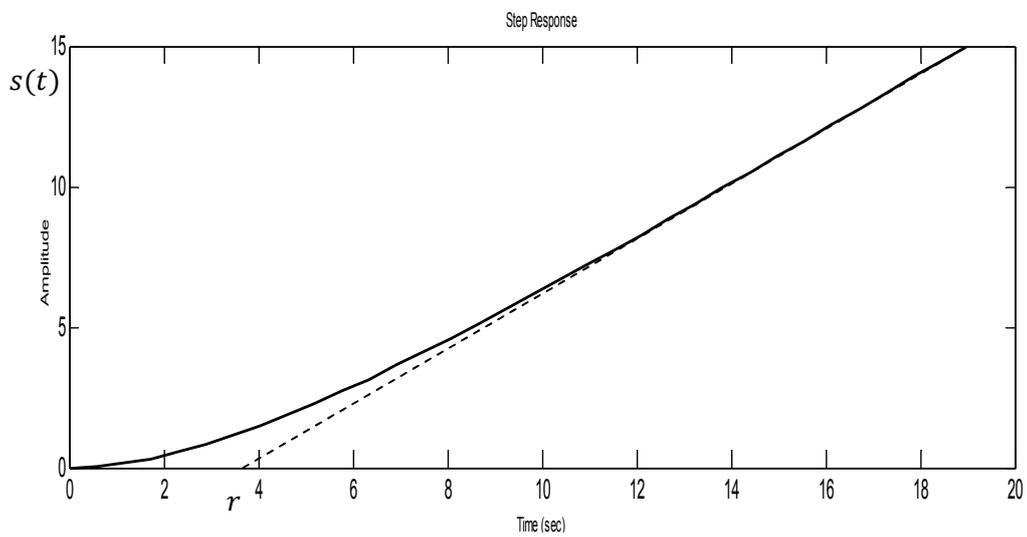
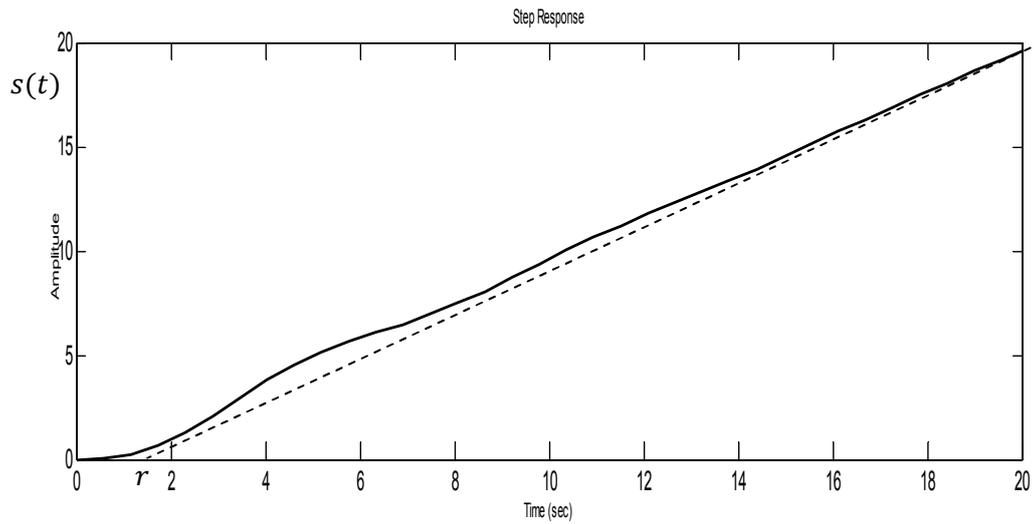
Les paramètres K , r et τ du modèle sont déterminés comme il est indiqué sur la Figure ci-dessus.

t_1 et t_2 sont obtenus en traçant la tangente qui passe par le point d'inflexion I . Il en résulte

$$r = t_1 \text{ et } \tau = t_2 - t_1$$

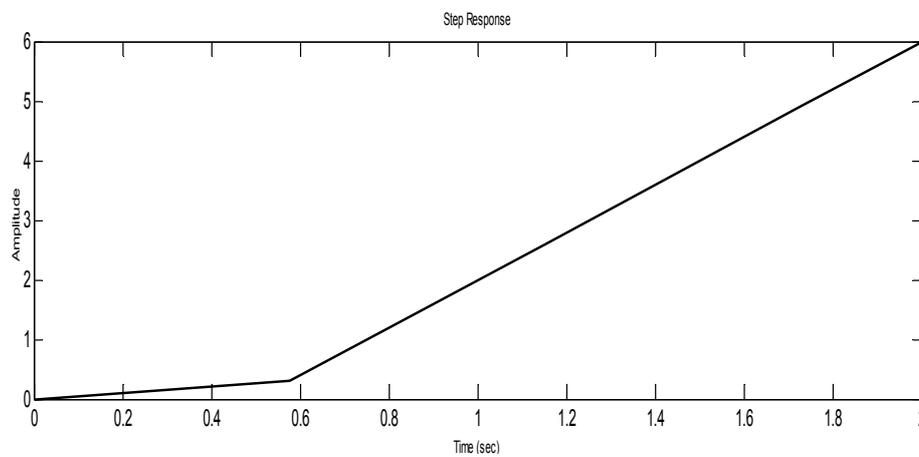
- Système instable





On approche la réponse à une rampe retardé :

$s(t) \approx a(t - r)u(t)$ avec a la pente de la rampe

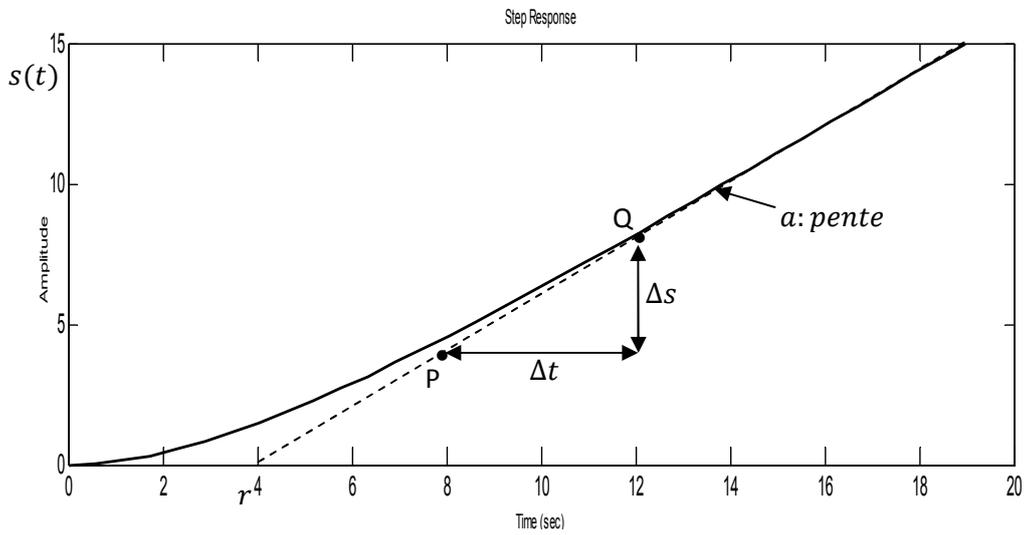


$$S(p) \approx \frac{a}{p^2} e^{-rp}$$

$$E(p) = \frac{A}{p}$$

⇒ la fonction de transfert $G(p) = \frac{S(p)}{E(p)} = \frac{a}{Ap} e^{-rp}$ de la forme $\frac{K}{p} e^{-rp}$

Identification :



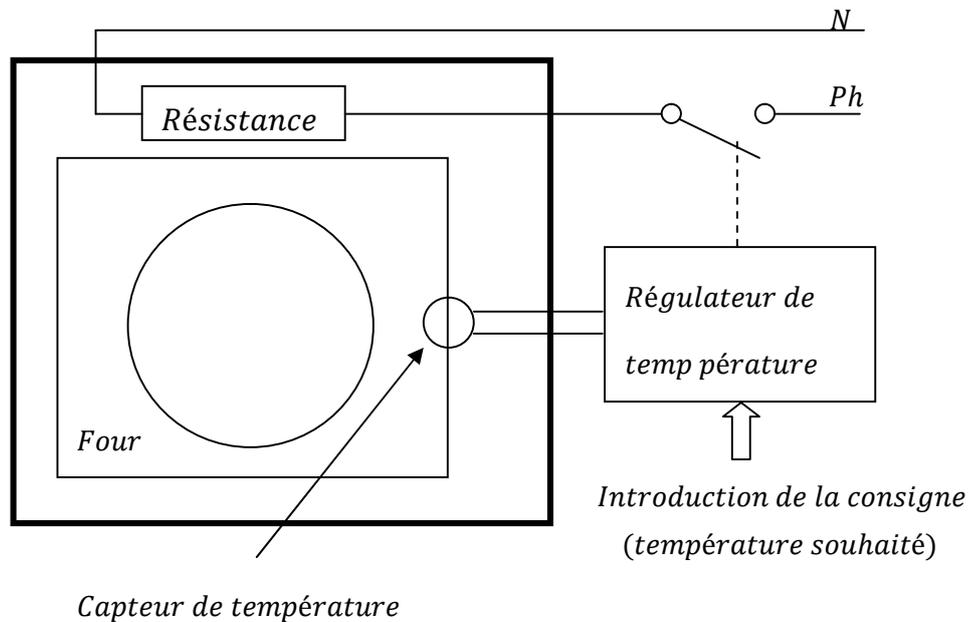
$$a = \frac{\Delta s}{\Delta t} \rightarrow K = \frac{a}{A} \rightarrow G(p) = \frac{K e^{-rp}}{p}$$

Chapitre 3

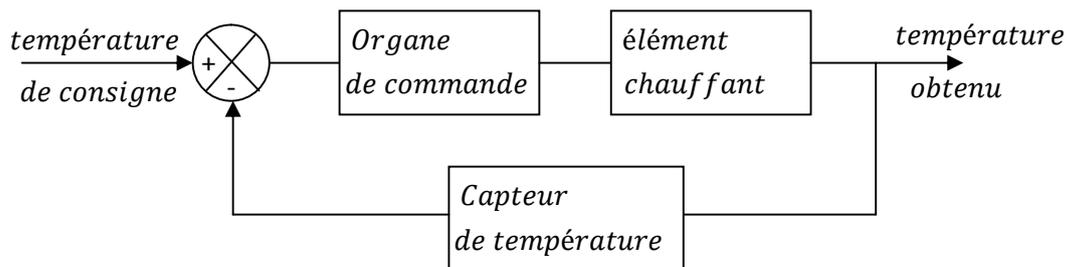
Synthèse de régulateurs

I. Régulation T.O.R. (Tout Ou Rien)

Exemple : four à cuisson



Le schéma de principe :

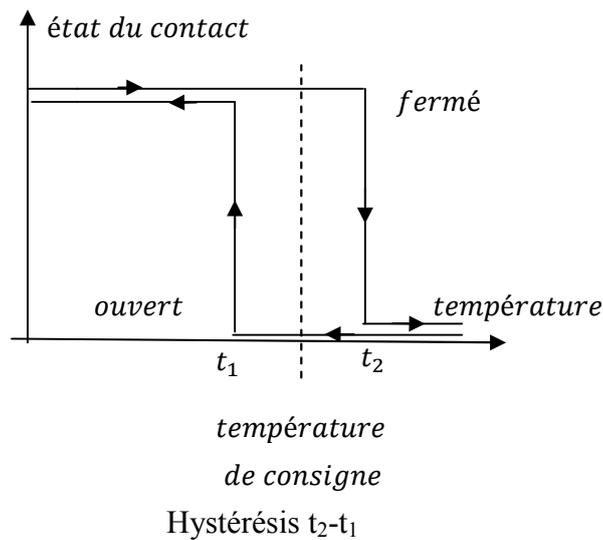
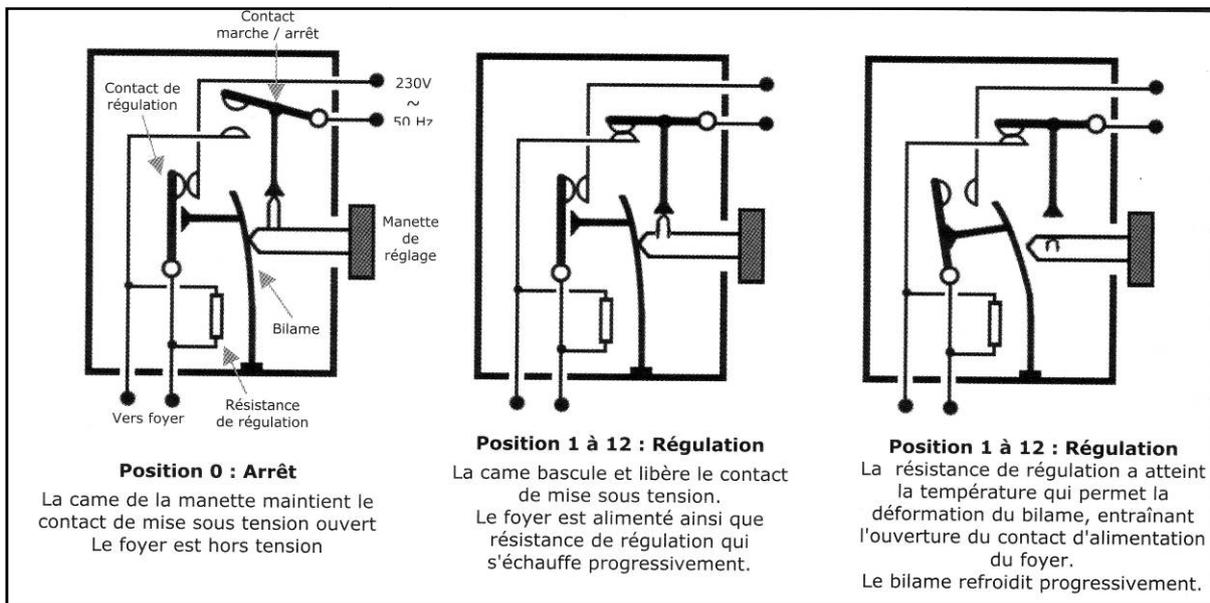


Exemple de capteur de température : le bilame

Principe du bilame : il est formé par deux lames soudées de matières différentes. Lors de l'échauffement une lame s'allonge plus que l'autre, alors le bilame se déforme.

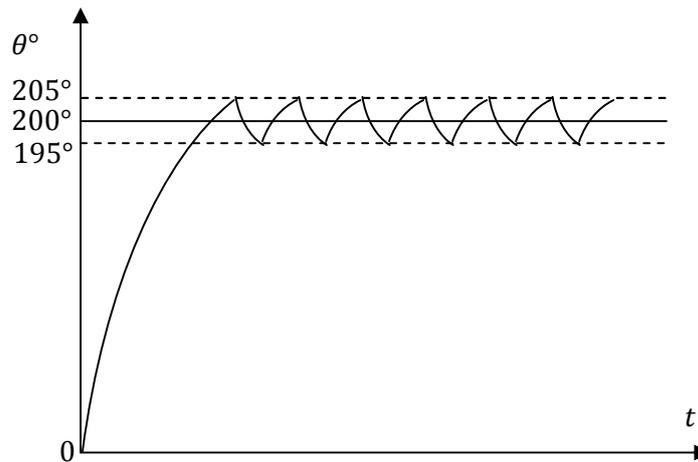
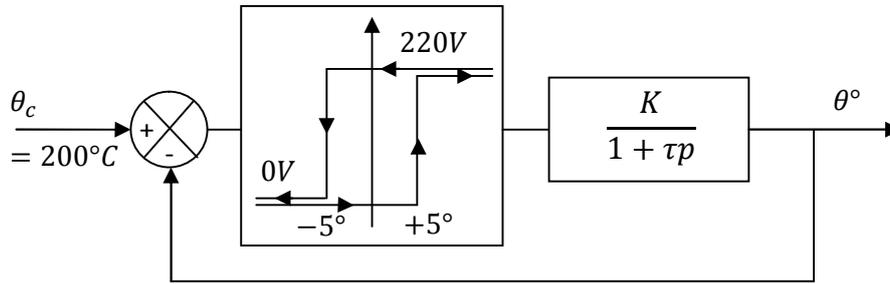


Contact à bilame :



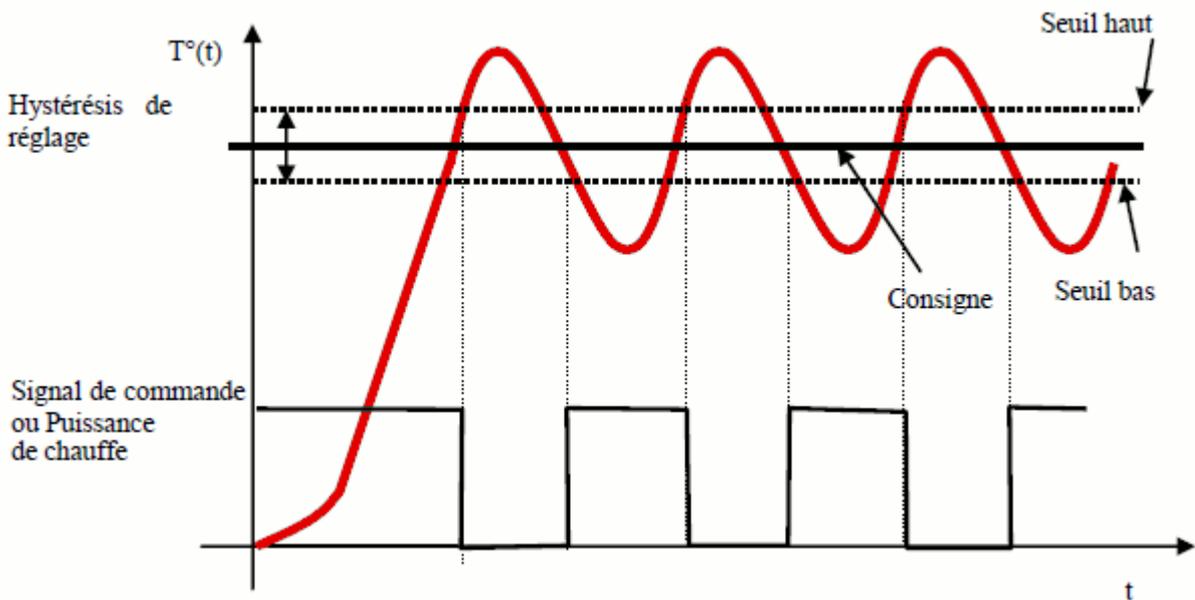
Supposons que la fonction de transfert de l'élément chauffant est $T(p) = \frac{K}{1+\tau p}$

Schéma fonctionnel :



Température du four

En réalité la courbe de chauffage possède l'allure suivante :



Allure réelle de la température à partir d'une commande TOR

II. Régulation par PID

II.1. Introduction

Rappelons les caractéristiques importantes :

- La stabilité : c'est impérative
- La rapidité : elle caractérise la facilité du système à réagir aux variations rapides du système. Lié à la bande passante du système.
- La précision : elle donnée par la valeur de l'erreur en régime établi.

II.2. Influence du gain proportionnel G_r

Son action sur trois performances :

- L'augmentation de la bande passante : rapidité
- L'augmentation du gain provoque l'instabilité
- La précision augmente

Equation du correcteur proportionnel :

$$u(t) = G_r \varepsilon(t)$$

Avec ε est l'écart entre la consigne et la mesure.

II.3. Action dérivée

L'action dérivée : à précision égale rend le système plus stable.

Equation du correcteur proportionnel dérivé :

$$s(t) = \varepsilon(t) + \tau_d \frac{d\varepsilon}{dt}$$

$$S(p) = (1 + \tau_d p) \varepsilon(p)$$

$$C(p) = 1 + \tau_d p$$

II.4. Action intégrale

L'action intégrale : à stabilité égale on rend le système plus précis.

Equation du correcteur proportionnel intégrale :

$$s(t) = \varepsilon(t) + \frac{1}{\tau_I} \int_t \varepsilon(t) dt$$

$$S(p) = \left(1 + \frac{1}{\tau_I p}\right) \varepsilon(p)$$

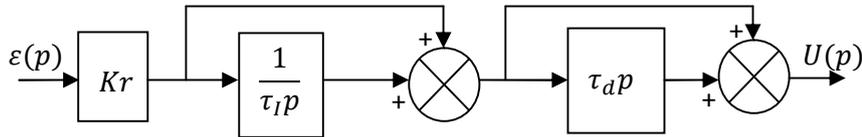
$$S(p) = \frac{1 + \tau_I p}{\tau_I p}$$

II.5. L'action Proportionnel Intégral Dérivée PID

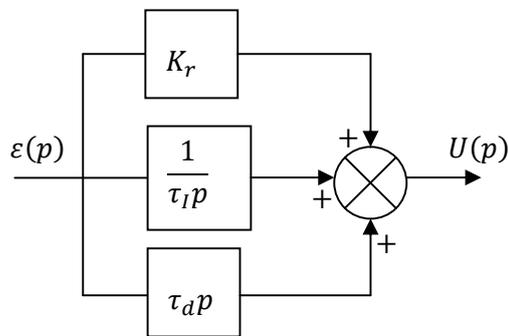
Le correcteur PID permet d'améliorer les performances globales : rapidité, stabilité et précision.

Il existe trois structures :

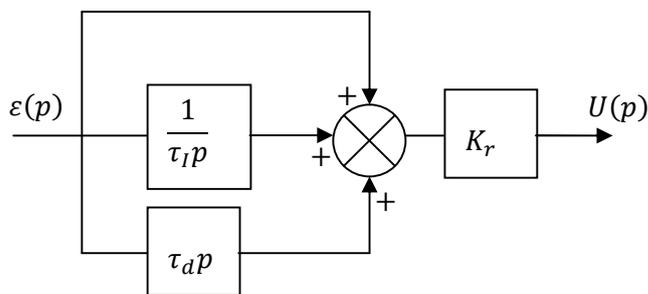
- La structure série : $C(p) = K_r \left(1 + \frac{1}{\tau_I p}\right) (1 + \tau_d p)$



- La structure parallèle : $C(p) = G_r + \frac{1}{\tau_I p} + \tau_d p$



- La structure mixte : $C(p) = G_r \left(1 + \frac{1}{\tau_I p} + \tau_d p\right)$



II.6. Méthodes de synthèse du régulateur PID :

a. Méthode d'approximations successives

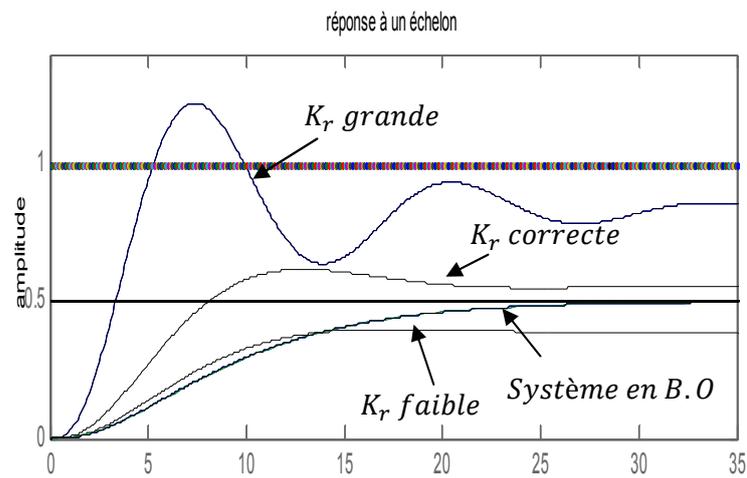
Le système est mis en boucle fermée. Puis on règle successivement l'action proportionnel, l'action intégrale et enfin l'action dérivée.

1. On annule l'action intégrale et dérivée en mettant $\tau_I = \infty$, $\tau_d = 0$.

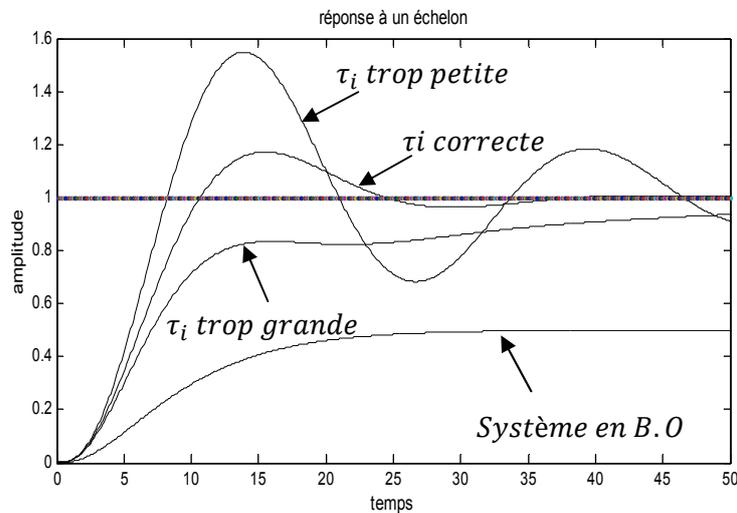
2. On augmente K_r (diminue $BP\% = 100/K_r$: bande proportionnelle) jusqu'à avoir la réponse la plus rapide avec un amortissement maximum et un écart minimum (voir 1^{ère} illustration).

3. On diminue τ_i pour annuler l'erreur statique et avoir la réponse la plus rapide avec un amortissement maximum et un écart minimum (voir 2^{ème} illustration).

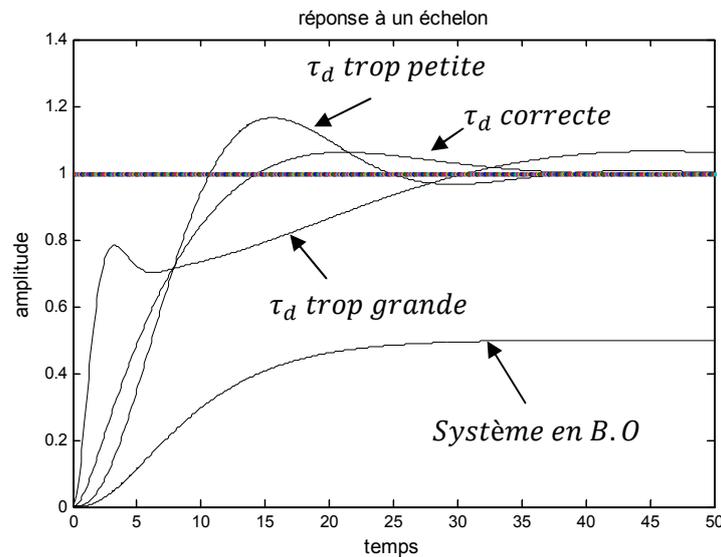
4. On augmente τ_d jusqu'à avoir la réponse optimale (voir 3^{ème} illustration).



Détermination du gain proportionnel par la méthode d'approximations successives



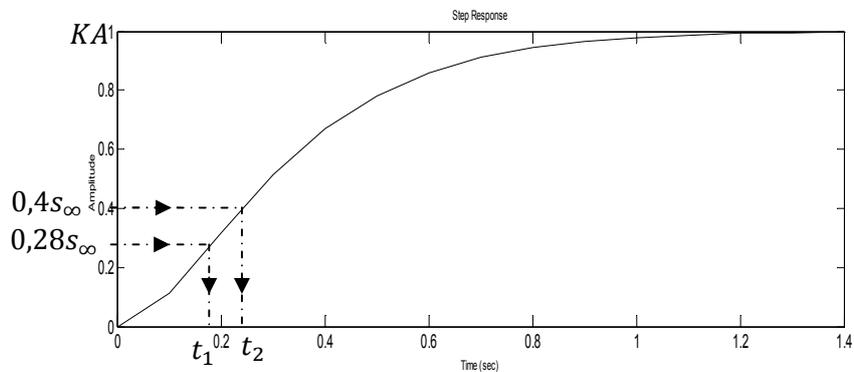
Détermination de la constante de temps intégrale par la méthode d'approximations successives



Détermination de la constante de temps dérivée par la méthode d'approximations successives

Du fait de sa simplicité, c'est une méthode très utilisée. Toutefois, son application devient longue sur les processus à grande inertie. Son principal avantage est de ne pas nécessiter des connaissances approfondies du processus et du réglage.

b. Méthode de Broïda



$$G(p) = \frac{Ke^{-rp}}{1 + \tau p}$$

$$K = \frac{s_{\infty}}{A}$$

$$\tau = 5,5(t_2 - t_1)$$

$$r = 2,8t_1 - 1,8t_2$$

b.1. Détermination du correcteur et de ses paramètres

En fonction du rapport τ/r , Broïda a établi le tableau suivant :

τ/r	$\Rightarrow 2$	$\Rightarrow 5$	$\Rightarrow 10$	$\Rightarrow 20$	$\Rightarrow \infty$
type de régulateur	Multi-boucles	PID	PI	P	TOR

Choix du type de régulateur en fonction du rapport τ/r selon Broïda

Une fois que le type de régulateur a été choisi, on se sert du tableau suivant pour déterminer complètement les paramètres des correcteurs.

Rappel : $BP\% = \frac{100}{K_r}$

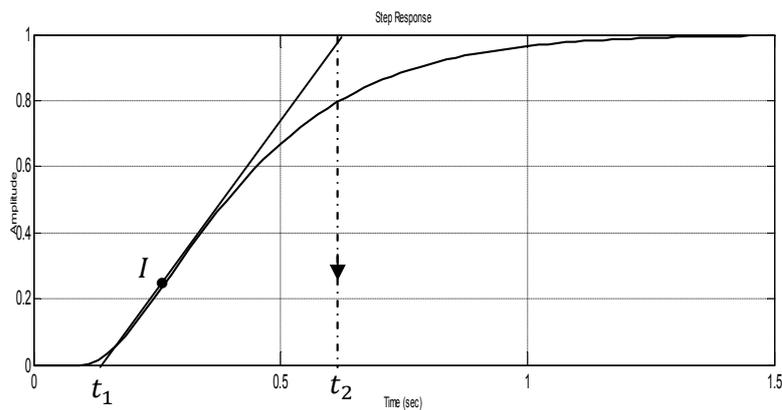
	P	PI série	PI //	PID série	PID //	PID mixte
BP%		$\frac{125 K \cdot r}{\tau}$		$\frac{118 K \cdot r}{\tau}$	$120 K \cdot r(\tau + 0,4r)$	
K_r		$0,8 \frac{\tau}{K \cdot r}$		$0,85 \frac{\tau}{K \cdot r}$	$\frac{0,83}{K \cdot r(\tau + 0,4r)}$	
τ_i	Maxi	τ	$1,25 K \cdot r$	τ	$\frac{1,3K}{r}$	$\tau + 0,4r$
τ_d		0		0,4r	$\frac{0,35\tau}{K}$	$\frac{\tau \cdot r}{r + 2,5\tau}$

Calcul des paramètres des correcteurs établis suivant la méthode de Broïda

c. Méthodes de Ziegler-Nichols

c.1. Méthode de Ziegler&Nichols en boucle ouverte

c.1.1. Détermination des paramètres du correcteur pour des processus stables



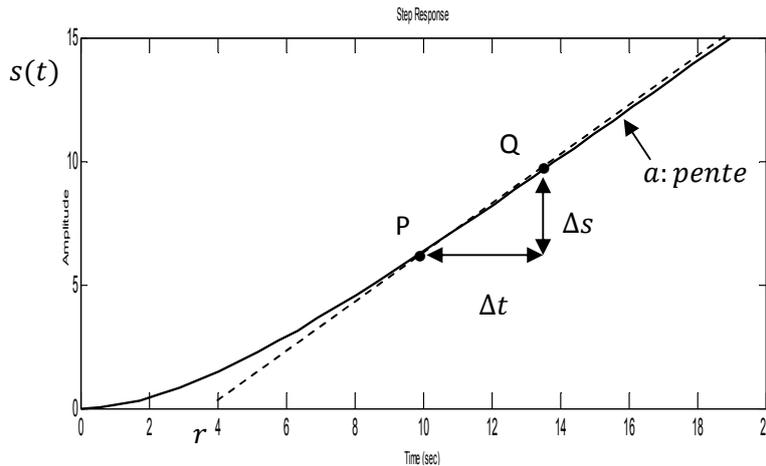
$$r = t_1 \text{ et } \tau = t_2 - t_1$$

On obtient le tableau suivant :

	P	PI série	PID mixte
K_r	$\frac{\tau}{r}$	$\frac{0,9\tau}{r}$	$1,27 \frac{\tau}{r}$
τ_i	_____	$3,3 r$	$2 r$
τ_d	_____	_____	$0,5 r$

Calcul des paramètres des correcteurs par la méthode de Ziegler et Nichols.

c.1.2. Détermination des paramètres du correcteur pour des processus instables



$$a = \frac{\Delta s}{\Delta t} \rightarrow K = \frac{a}{A} \rightarrow G(p) = \frac{K e^{-rp}}{p}$$

Le modèle mathématique est alors du type $G(p) = \frac{K e^{-rp}}{p}$. On identifie de la façon suivante :

Choix des paramètres de réglage

Le choix du mode de régulation est lié à la réglabilité du système déterminé par le produit $K.r$.

Si $K.r$ est inférieur à 0,05 : régulation tout-ou-rien.

Si $K.r$ est compris entre 0,05 et 0,1 : régulation P.

Si $K.r$ est compris entre 0,1 et 0,2 : régulation PI.

Si $K.r$ est compris entre 0,2 et 0,5 : régulation PID.

Si $K.r$ est supérieur à 0,5 . Il faut utiliser des boucles multiples.

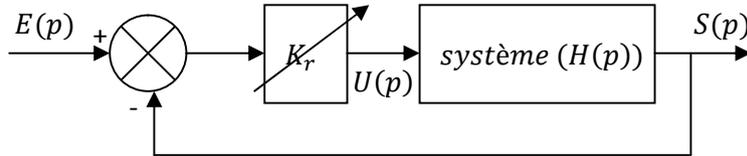
Une fois que le type de régulateur a été choisi, on se sert du tableau suivant pour déterminer complètement les paramètres de correcteur.

	P	PI série	PI //	PID série	PID //	PID mixte
BP%	125 Kr			118 $K.r$	111 $K.r$	
K_r	$\frac{0,8}{Kr}$			$\frac{0,85}{K.r}$	$\frac{0,9}{K.r}$	
τ_i	Maxi	5 r	6,66 $K.r^2$	4,8 r	6,66 $K.r^2$	5,2 r
τ_d	0			0,4r	$\frac{0,35}{K}$	0,4r

Paramètres des correcteurs pour des systèmes instables

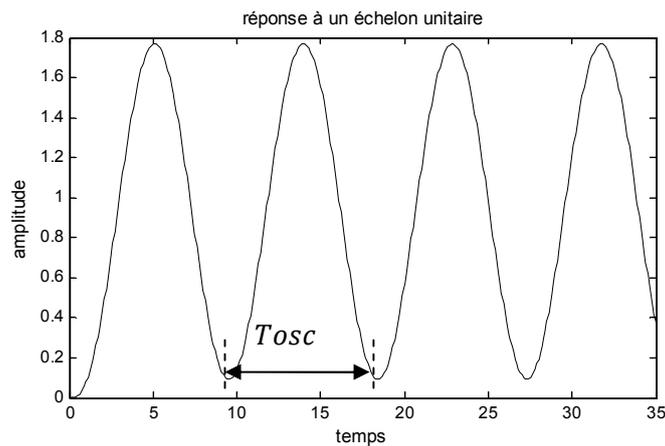
c.2. Méthode de Ziegler&Nichols en boucle fermée

Lors de l'identification en bo, les instants de mesure sont assez éloignés et des perturbations peuvent apparaître. Les méthodes énoncées ci-dessus sont assez imprécises. enbf, si le système le permet, on peut l'amener à la limite de stabilité, ce qui conduit à avoir une phase de -180° et un gain en module de 1. Donc, on supprime l'effet régulateur et on augmente K_r jusqu'aux oscillations de pompage.



Donc on procède comme suit :

Le SL étant bouclé, on n'utilise que le correcteur P. On augmente K_r jusqu'à ce que des oscillations entretenues, sans saturation, apparaissent (analogue à un sinus). On note alors B_{Posc} (K_{rosc}) et la valeur de la période des oscillations T_{osc} . Puis on détermine les paramètres du correcteur en utilisant le Tableau ci-dessous.



	P	PI série	PI //	PID série	PID //	PID mixte
BP%	2 B_{Posc}	2,2 B_{Posc}		3,3 B_{Posc}	1,7 B_{Posc}	
K_r	0,5 K_{rosc}	0,45 K_{rosc}		0,3 K_{rosc}	0,6 K_{rosc}	
τ_i	Maxi	0,83 T_{osc}	$2 \frac{T_{osc}}{K_{rosc}}$	0,25 T_{osc}	$0,85 \frac{T_{osc}}{K_{rosc}}$	0,5 T_{osc}
τ_d	0			0,125 T_{osc}	0,075 $T_{osc} \cdot K_{rosc}$	0,125 T_{osc}

Paramètres des correcteurs à partir de la méthode de pompage et de la BF pour la méthode de Ziegler&Nichols

d) Méthodes de Chien-Hrones-Reswick

Cette méthode représente une amélioration de la méthode de Ziegler-Nichols temporelle, qui peut parfois générer des constantes de temps intégrales trop petites. Chien-Hrones-Reswick proposent de travailler avec le modèle de Broïda, soit $T(p) = \frac{Ke^{-Tp}}{1+\tau p}$ et donnent des tableaux pour obtenir des systèmes plus amortis en boucle fermée, soit un dépassement de 0% ou de 20%. Ils distinguent le fonctionnement en régulateur (entrée constante et rejet des perturbations, Tableau 9) et le fonctionnement en poursuite (perturbations nulles et entrée variable, Tableau 10). Les réglages sont proposés pour une réponse en boucle fermée à coefficient d'amortissement $z=0,7$, soit un t_r minimum.

dépassement	régulateur	P	PI	PID
0%	K_r	$0,3 \frac{\tau}{T}$	$\frac{0,6\tau}{T}$	$0,95 \frac{\tau}{T}$
	τ_i	_____	$4T$	$2,4T$
	τ_d	_____	_____	$0,42T$
20%	K_r	$0,7 \frac{\tau}{T}$	$\frac{0,7\tau}{T}$	$1,2 \frac{\tau}{T}$
	τ_i	_____	$2,3T$	$2T$
	τ_d	_____	_____	$0,42T$

Tableau 9 : réglage des régulateurs selon Chien-Hrones-Reswick en régulation

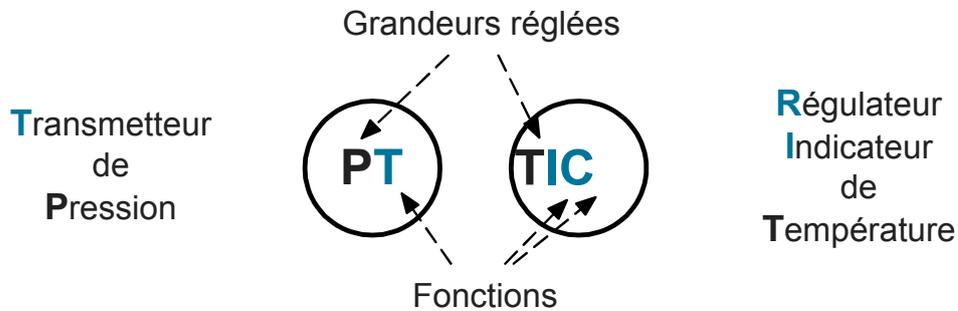
dépassement	régulateur	P	PI	PID
0%	K_r	$0,3 \frac{\tau}{T}$	$\frac{0,35\tau}{T}$	$0,6 \frac{\tau}{T}$
	τ_i	_____	$1,2\tau$	τ
	τ_d	_____	_____	$0,5T$
20%	K_r	$0,7 \frac{\tau}{T}$	$\frac{0,6\tau}{T}$	$0,95 \frac{\tau}{T}$
	τ_i	_____	τ	$1,4\tau$
	τ_d	_____	_____	$0,47T$

Tableau 10 : réglage des régulateurs selon Chien-Hrones-Reswick en poursuite

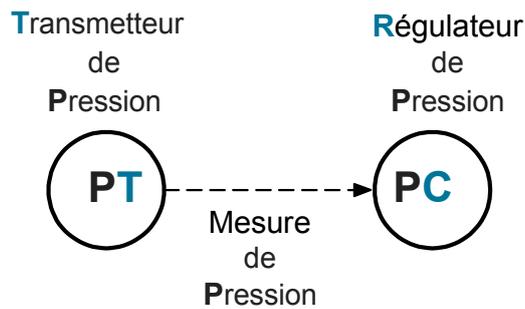
Chapitre 4

Le schéma TI

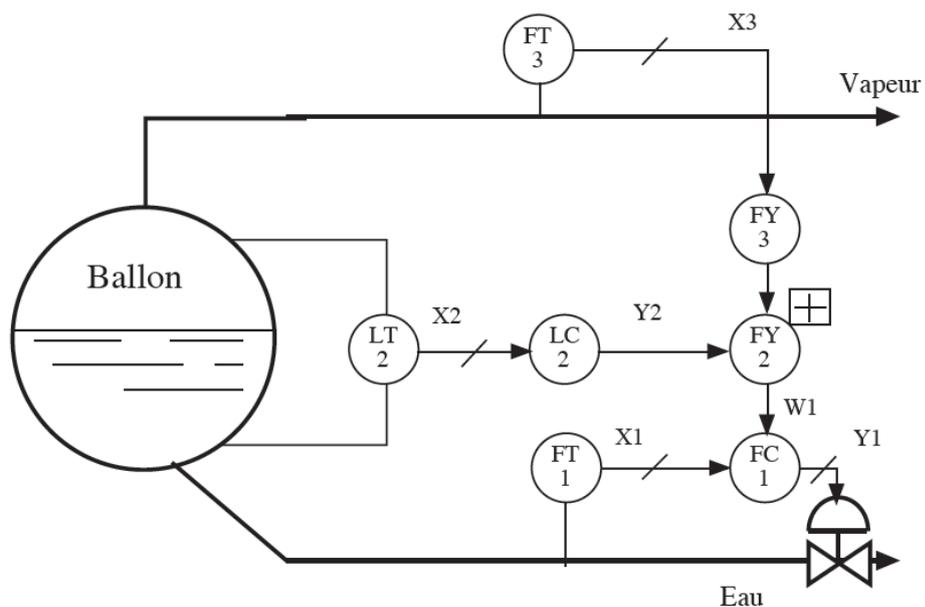
Lanorme NFE04-203définit lareprésentationsymboliquedesrégulations,mesuresetautomatisme des processus industriels. Les instruments utilisés sont représentés par des cercles entourant des lettres définissant lagrandeurphysiquerégléetleur(s)fonction(s).Lapremièrelettredefinie lagrandeur physique réglée, les suivantes la fonction des instruments.



Les parcours de l'information est matérialisé par une flèchedont l'allure dépend du support de l'information.



Cetteinstrumentationestplacéesurunschémareprésentantlatuyauterieetlesprincipauxélémentsde l'installation. Ci-dessous une régulation de niveau dans le ballon avec correction de tendance.



Les principales lettres utilisées :

1			2				3			4			5	
Variable mesurée			Premier élément				Fonction			Dispositif réglant			Signalisation	
1.1	1.2	1.3	2.1	2.2	2.3	2.4	3.1	3.2	3.3	4.1	4.2	4.3	5.1	5.2
Signification	Initiale	Modificateur	Elément primaire Capteur	Indicateur	Transmetteur	Enregistreur Imprimante	Régulation	Commutation Contacts	Relais divers et de calcul	Organe de réglage	Actionneur	Autonome	Lampe témoin	Alarme
	A à Z	F Q	E	I	T	R	C	H(H) S M L(L)	Y	V	Z	CV	I (H) L M L(L)	H(H) A M L(L)
Tension Electrique	E			E										
Débit	F	FF FQ	FE	FI FFI FQI	FT FIT FFT FQT FFIT..	FR FFR FQR	FC FC FC FRC FFC FFRC	FSSH FSH FSM FSL FSL	FY FFY	FV FFV	FZ FFZ	FCV	FLHH FFLHH FQLHH FLH FFLH...	FAHH FFAHH FOAHH FAH FFAH..
Courant électrique				I										IAHH IAH..
Action humaine Niveau	H L		LE	LI	LT, LIT	LR	LC LRC	LIC LSHH LSH LSM..	LY	LV	LZ	LCV	LLHH LLH LLM..	LAHH LAH LAM..
Pression	P	PD	PE	PI PDI	PT PDT	PR PDR	PC PC PDC PDC	PSSH PDSHH ...	PY PDY	PV PDV	PZ PDZ	PCV PDCV PSV	PLHH PDLHH PLH	PAHH PDAHH PAH ...
Température	T		TE	TI	TT TIT	TR	TC TC	TSHH TSH...	TY	TV	TZ	TCV	TLHH TLH..	TAHH TAH..

Modificateur 1.3 D: différentiel F: fraction (rapport) Q: quantité (totalisateur, intégrateur, compteur)

Commutation 1.3 Lampetémoin 5.1 et Alarme 5.2 peuvent comporter un qualificatif:
 HH: très haut H: haut M: milieu (intermédiaire) L: bas LL: très bas

Les principaux symboles utilisés :

PRINCIPAUX SYMBOLES des SCHEMAS D'INSTRUMENTATION (PCF et TI)

N°	Dénomination	Symbole
1.4.1	Point de mesure	
1.4.2	Instrument	
1.4.4	Instrument de tableau	
1.4.5	Organe de réglage	
1.4.5.1	Actionneur manuel	
1.4.7	Dispositif réglant (Symbole général)	
1.6.1.2	Croisements sans raccordement	
	Croisements avec raccordement	

1.6.1.2	Sens de l'écoulement	
1.6.1.3	Sens de l'information	
2.3.1	Signal électrique	
	ou	
2.3.2	Signal pneumatique	
2.3.8	Interliaison logicielle ou bus	
2.5.1.1	Elément primaire de mesure de débit	
2.5.1.2	Diaphragme	
2.7.3.2.2	Régulateur autonome (régulation aval) avec prise interne. (Détendeur)	
2.10.3.3	Actionneur pneumatique à membrane avec positionneur	
3.4.2	Calculateur de processus (Système de contrôle-commande)	

3.4.3	Calculateur de supervision (superviseur)	
3.4.4	Automate	
3.5.2	Convertisseur de signal: a vers b A : analogique B : binaire D : numérique E : tension H : hydraulique I : courant O : électromagnétique ou sonique P : Pneumatique R : Résistance	 Exemple : convertisseur courant vers tension sur une boucle de température :
3.5.3.1	opérateur d'addition	
3.5.3.2	opérateur de différence	
3.5.3.4	opérateur de gain	
3.5.3.7	opérateur de multiplication	
3.5.3.8	opérateur de division	
3.5.3.9	opérateur d'extraction de racine carrée	

	Pompe	
	Pompe volumétrique	
	Electrovanne	

D'autres symboles peuvent être utilisés en fonction des besoins mais dans ce cas leur signification est explicitée.

À partir d'un schéma TI, on peut construire le schéma fonctionnel correspondant.

Exemple : une régulation de pression

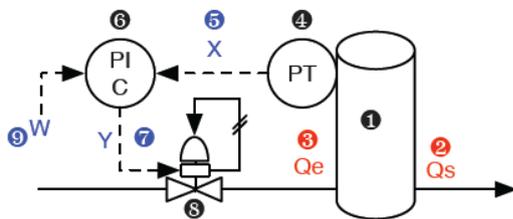


Schéma TI

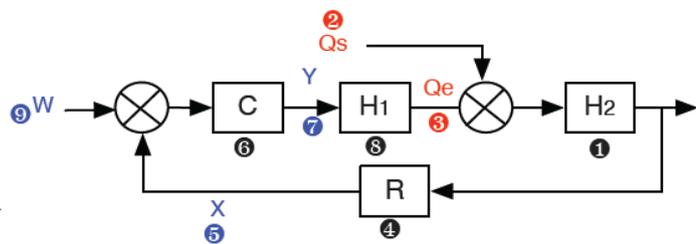
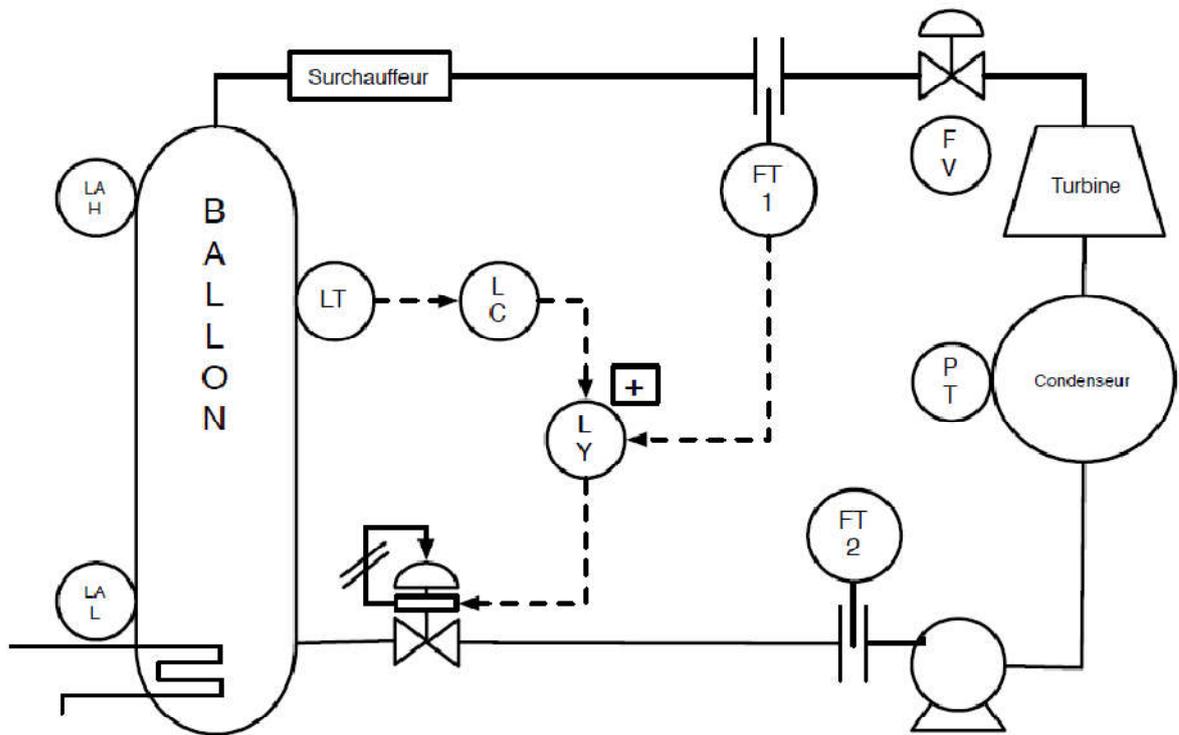


Schéma Fonctionnel

Exercice : en déduire les schémas fonctionnels à partir des schémas TI ci-dessus et ci-dessous :



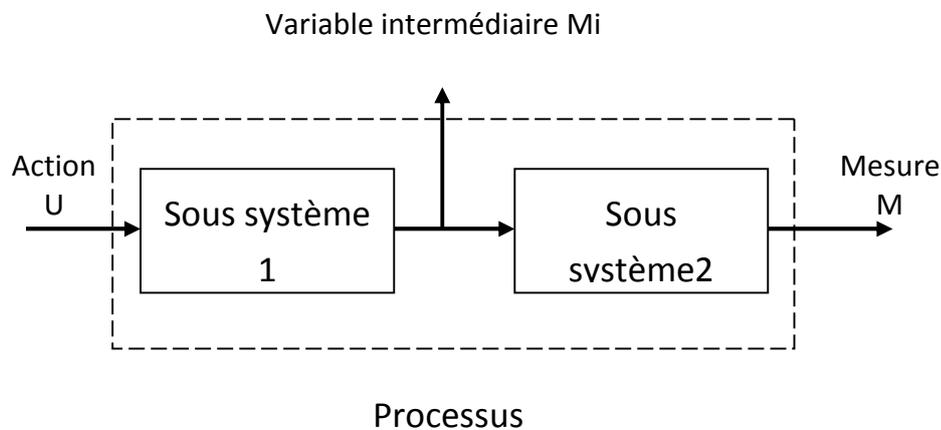
Chapitre 5

La régulation cascade

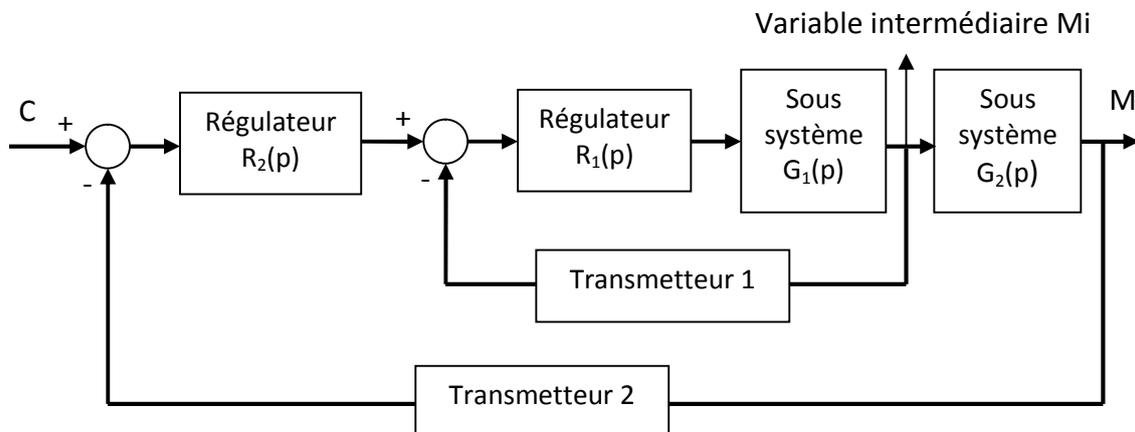
I. Principe de régulation cascade

La régulation cascade est une technique utilisée pour permettre aux procédés qui ont une dynamique lente d'avoir une réponse rapide face aux perturbations extérieures ainsi qu'aux changements de consigne.

L'idée repose sur la décomposition d'un processus complexe en plusieurs sous-systèmes. Sans perte de généralité, on suppose pour fixer les idées une décomposition en deux sous-systèmes comme le montre la figure suivante :



La variable intermédiaire M_i généralement appelée variable d'état, possède la propriété d'être en avance temporelle par rapport à la grandeur de mesure M . Si par exemple une modification sur l'action U ou une perturbation affectant le sous-système 1, la variable d'état M_i sera la première à être affectée avant la variable de mesure M . En d'autres termes, la grandeur d'état M_i permet de renseigner sur l'état futur de M . Cette forme de prédiction peut être exploitée judicieusement pour réaliser une régulation cascade.



La grandeur principale est contrôlée par une boucle 'maître' avec un régulateur $R_2(p)$, dont la sortie sert de consigne à la boucle secondaire, régulé par le régulateur $R_1(p)$. Le reproche qu'on fait habituellement à une boucle de régulation classique est que le régulateur ne commence à réagir pour effectuer une correction suite à l'effet d'une perturbation qu'une

fois qu'il en est informé, c'est-à-dire qu'une fois que la mesure s'en trouve modifiée.

Avec la structure cascade, si une perturbation affecte le sous-système 1, celle-ci sera prise en charge par la boucle interne. Cette boucle doit être bien dimensionnée de manière à ce qu'elle soit rapide, et ainsi l'effet de la perturbation peut être neutralisée sans qu'il y'a une répercussion significative sur la grandeur principale.

Donc, une condition impérative pour l'efficacité de la boucle cascade est que la boucle interne doit être rapide et plus précisément, elle doit plus rapide que la boucle externe. D'ailleurs on note d'après le schéma fonctionnel de la boucle cascade que le sous-système 1 a été remplacé par une boucle interne. Il va de soit que le régulateur R_1 doit être paramétré de manière à assurer cette rapidité.

Mais l'avance temporelle de la variable état M_i sur M ne sera plus acquise si une perturbation affecte le sous-système 2, mais elle continuera à l'être néanmoins en cas de changement de consigne. Compte tenu que l'avantage de la boucle cascade est de diminuer le régime transitoire, ce changement de consigne sera traité plus rapidement.

b) Exemples

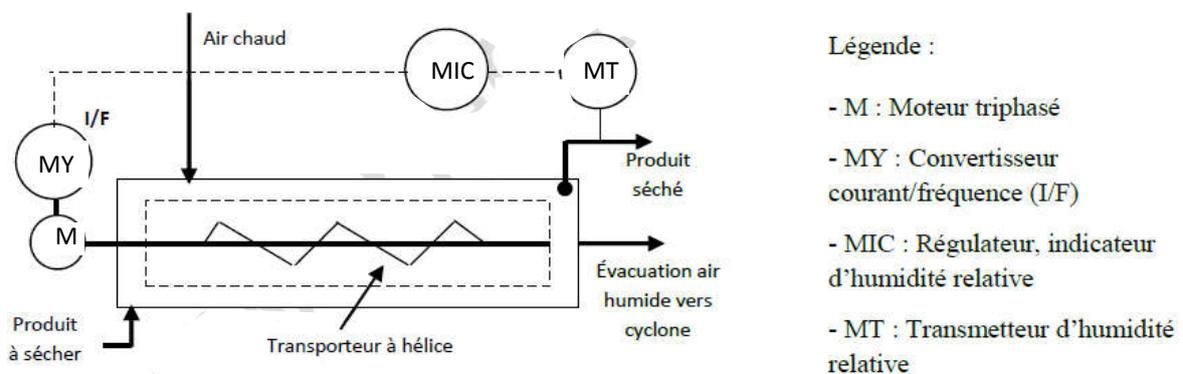
Exemple 1 : Procédé de séchage des solides en continu

La figure ci-dessous représente de manière simplifiée une unité de séchage des solides en continu. Le séchage est une opération permettant d'enlever, par évaporation, le solvant imprégnant un solide.

La vaporisation du solvant nécessite de l'énergie qui est apportée par l'intermédiaire d'un agent séchant, l'air chaud.

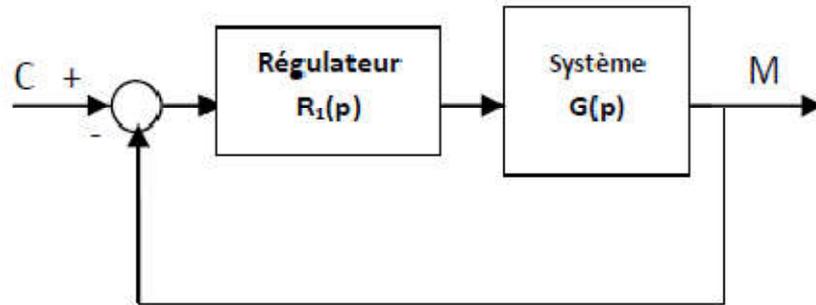
L'air de séchage est réchauffé, puis envoyé dans le sécheur contenant le solide à sécher. L'air de séchage, saturé par la vapeur de solvant après le contact avec le solide à sécher, est envoyé dans un cyclone pour récupérer les poussières. Le solide séché est récupéré à la sortie du sécheur. Le cyclone n'apparaît pas sur le schéma.

Le transporteur à hélice est entraîné en rotation par un moteur asynchrone triphasé alimenté par un convertisseur de fréquence, lui-même piloté par un courant 4-20 mA. Ce transporteur fait partie du sécheur.



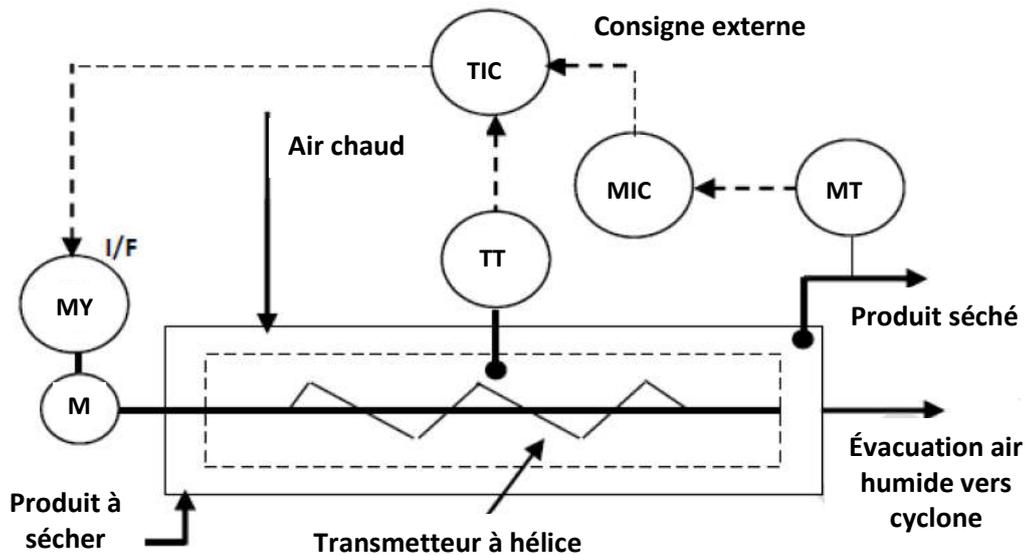
Le taux d'humidité relative, grandeur caractéristique du procédé, est contrôlé par une boucle simple agissant sur la vitesse de rotation de la vis d'Archimède du transporteur du solide à sécher.

L'organisation fonctionnelle est représentée par le schéma suivant :



$R_1(p)$ est le régulateur du taux d'humidité et $G(p)$ est la fonction de transfert globale du procédé constitué par le convertisseur I/F, le moteur, le transporteur, et le transmetteur du taux d'humidité.

Afin d'améliorer le contrôle d'humidité, on envisage une régulation cascade en exploitant l'information de température du produit en cours de séchage comme le montre la figure ci-dessous. La variable d'état est matérialisée par la température à l'intérieur du sécheur en avance temporelle par rapport au taux d'humidité. Par conséquent, toute perturbation affectant le système notamment le débit d'air chaud sera détecté d'abord par le transmetteur de température.



II. Mise au point de la régulation cascade

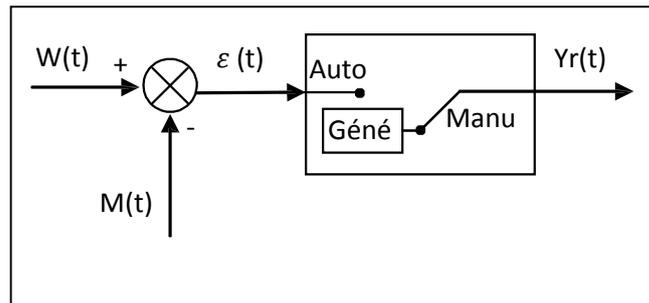
Les étapes à suivre pour la mise au point d'une régulation cascade sont les suivantes :

- Détermination du sens d'action des régulateurs.
- Réglage de la boucle interne (régulateur asservi).
- Mise en service du régulateur asservi (passage de consigne interne en consigne externe sans à coups).
- Réglage de la boucle externe (régulateur pilote).

II.1. Choix du sens d'action des régulateurs

a. Modemanuel, mode automatique du régulateur

Lorsque le régulateur est en mode **manuel**, la boucle de régulation est ouverte, le régulateur joue le rôle de générateur, ce qui permet de régler la sortie Y_r à la valeur désirée. Lorsque le régulateur est en mode **automatique**, la boucle de régulation est fermée, on règle la consigne W à la valeur souhaitée et le régulateur travaille pour annuler l'écart $\varepsilon(t)$ entre consigne et mesure. Ce réglage de W est réalisé sur sa façade (consigne interne) ou grâce à un signal extérieur (consigne externe).



Structure du régulateur

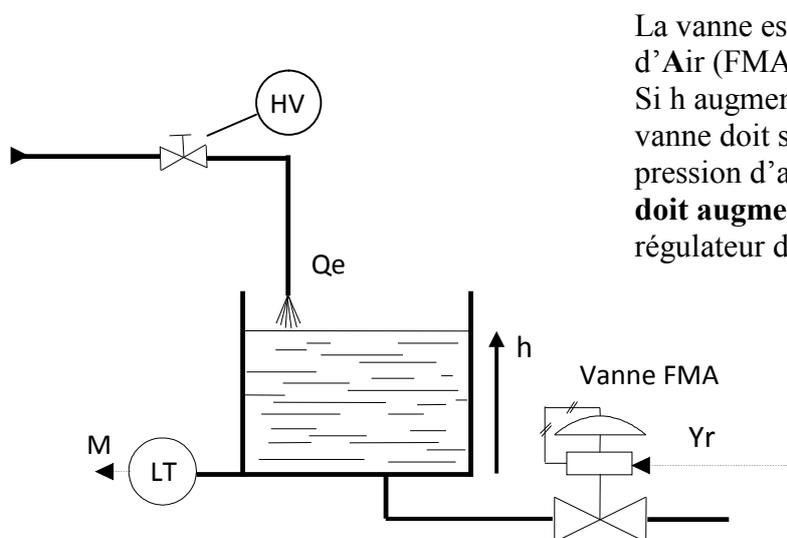
b. Sens directe et sens inverse du régulateur

Selon la configuration du procédé, l'organe correcteur peut être amené à s'ouvrir lorsque l'écart entre la mesure et la consigne devient positif ou, au contraire, à se fermer.

Si le signal de sortie du régulateur varie dans le même sens que l'écart, le sens d'action sera dit DIRECT

Si le signal de sortie varie de façon inverse, le sens d'action sera dit INVERSE.

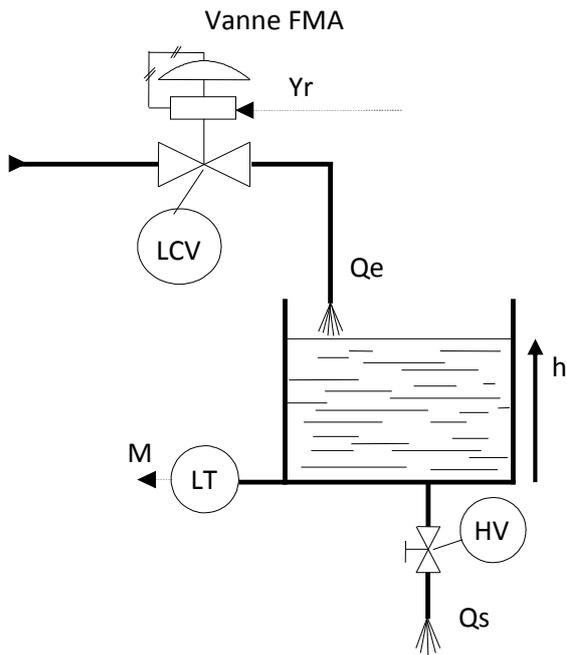
Exemple 1 :



La vanne est de type Fermée par Manque d'Air (FMA)

Si h augmente la mesure M augmente, la vanne doit s'ouvrir, il faut augmenter la pression d'air donc la sortie du régulateur doit augmenter Y_r . Le sens d'action du régulateur doit être **direct**.

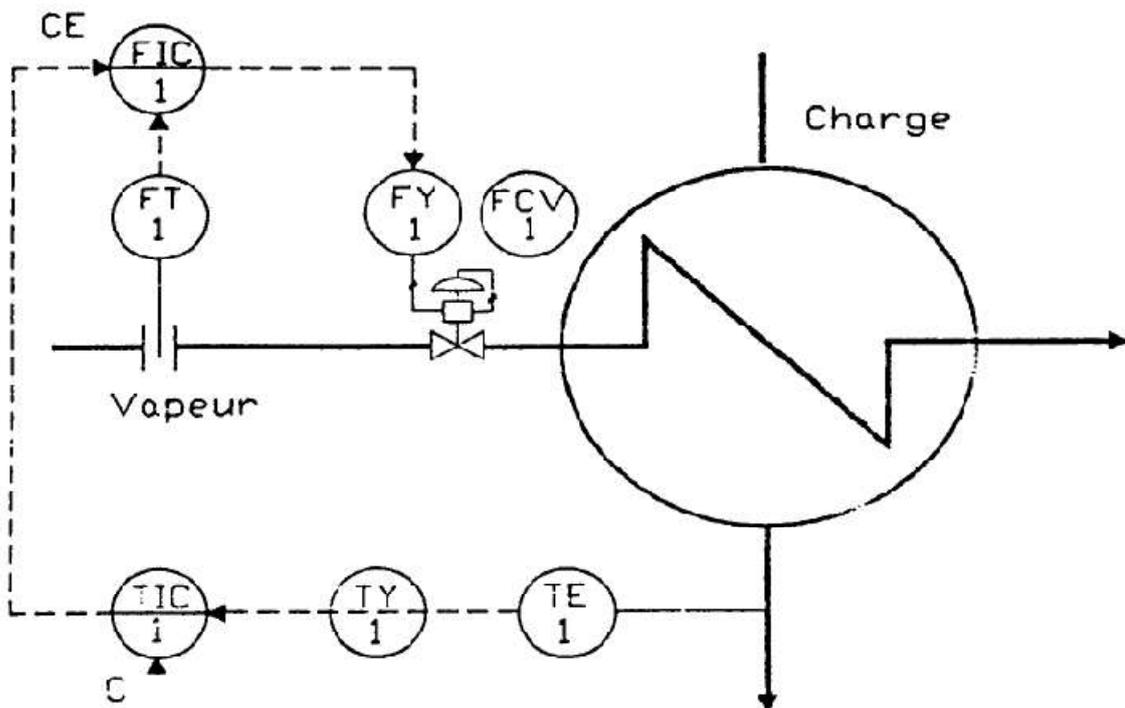
Exemple2:



Si h augmente **la mesure M** augmente, la vanne doit se fermer et la sortie du régulateur **Y_r doit diminuer** la pression d'air
Le sens d'action du régulateur doit être **inverse**.

Remarque : Le sens d'action du régulateur doit tenir compte du sens d'action de l'actionneur. Dans les exemples ci-dessus, si les vannes sont OMA, le sens d'action devient inverse dans l'exemple 1, et direct dans l'exemple 2.

Exemple 3 : choix du sens des régulateurs de cascade sur grandeur réglante.



L'ensemble vanne et positionneur FCV_1 est **direct**.

Lors d'une **augmentation de pression P_e** , la mesure de **débit augmente** et s'écarte du point de consigne. La sortie du régulateur **FIC1 doit diminuer** afin de fermer la vanne, celle-ci étant directe. Le régulateur **FIC1** doit être de sens **inverse**.

Lorsque la température **T_s augmente** (suite à une diminution de charge par exemple) et s'écarte du point de consigne, la sortie du **TIC1 doit diminuer** pour baisser la consigne du débit de combustible **Q_c** . Le régulateur **TIC1 doit donc être de sens inverse**.

II.2. Réglage de la boucle interne (régulateur asservi)

La grandeur régulée par la boucle interne étant rapide (généralement un débit), la méthode de réglage la mieux adaptée est la méthode par approches successives, en mode de régulation PI.

La recherche des valeurs optimales des actions du régulateur asservi en automatique et en consigne interne (mode PI).

Dans le cas d'une cascade sur une grandeur intermédiaire, il se peut qu'une méthode de calcul d'actions après identification du procédé soit plus judicieuse.

II.3. Passage manuel/automatique/cascade sans à coups

La mise en service du régulateur asservi, impose une manipulation d'équilibrage pour passer d'un mode de fonctionnement à un autre, afin d'éviter des à coups sur la vanne.

Reprenons l'exemple de la cascade sur la grandeur réglante

- Le régulateur FIC1 étant en manuel, mettre sa consigne interne égale à la mesure de débit combustible, passer ensuite le régulateur en automatique avec consigne interne. Cet équilibrage se fait automatiquement sur les régulateurs possédant un mode consigne suivieuse.
- Le régulateur FIC1 étant en automatique et en consigne interne, mettre la sortie manuelle du régulateur TIC1 égale à la consigne interne du FIC1, passer ensuite ce dernier en consigne externe.

Cet équilibrage se fait automatiquement par configuration sur les SNCC (systèmes numériques de contrôle de commande) de procédé, ou par câblage sur les régulateurs numériques monoblocs.

Dans les deux cas, on oblige la sortie du régulateur pilote à suivre la consigne interne du régulateur asservi, lorsque ce dernier n'est pas en mode cascade.

II.4. Réglage de la boucle externe (régulateur pilote)

Pour la boucle externe, on a le choix entre les méthodes de réglage vues dans la mise au point de la boucle fermée simple. (par approches successives, réglage par la méthode de Ziegler et Nichols, calcul des actions après identification du procédé).

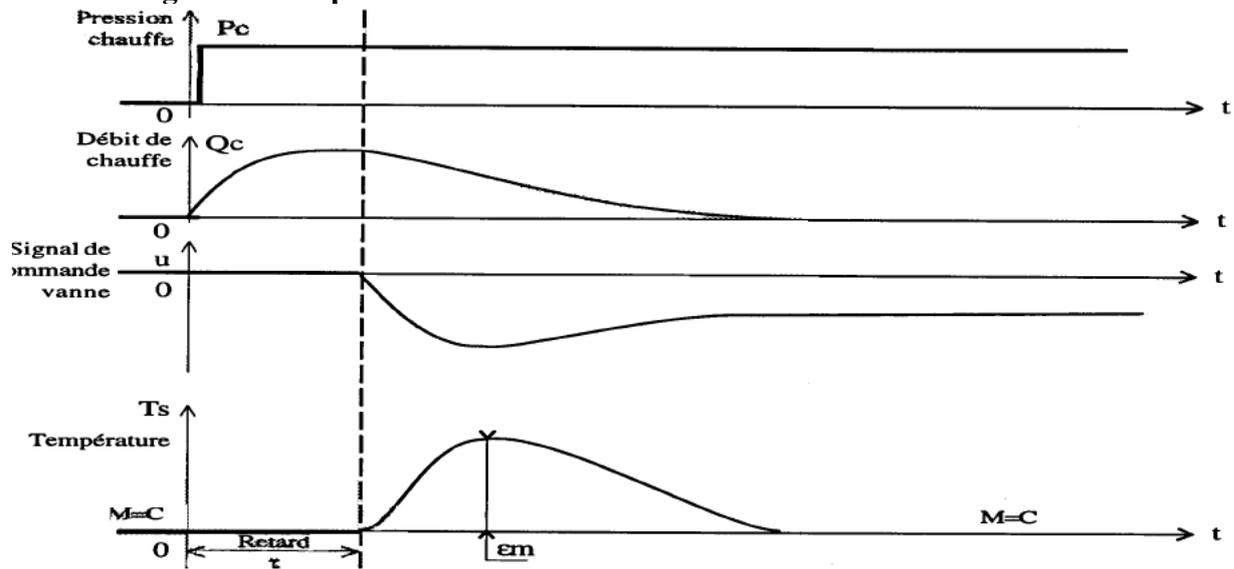
Quelle que soit la méthode de réglage choisie, la mise au point de la boucle externe se fait **régulateur asservi en cascade**.

Si l'on choisit le calcul des actions après identification du procédé, c'est l'ensemble procédé plus boucle interne que l'on doit identifier. Pour cela il faut faire un échelon ΔS sur la sortie

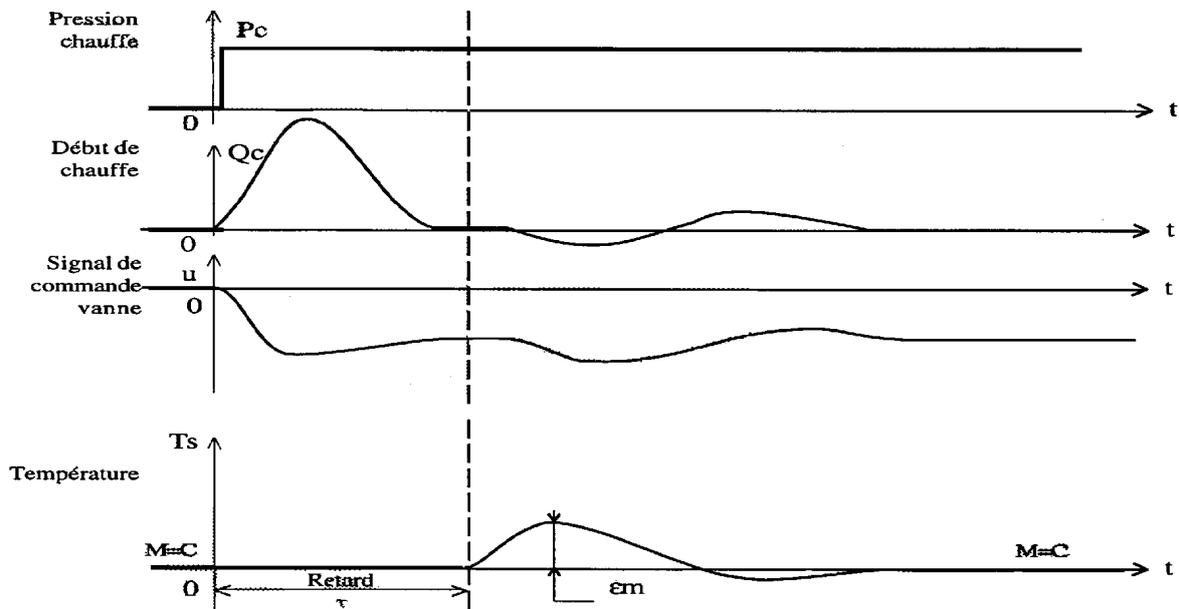
manuelle du régulateur TIC1 et analyser la réponse de la grandeur réglée TS1. Dans ce cas le gain statique $G_s = \Delta M / \Delta S$.

c. Résultats comparatifs

a- Allure des signaux lors d'une perturbation de pression de chauffe (P_c) pour une boucle de régulation simple:



b- Allure des signaux lors d'une perturbation de pression (P_c) pour une boucle de régulation cascade :



Quelques indications sur les régulateurs industriels

Mesure : PV (ProcessVariable)

Sortie : OUT (Output)

Consigne : SP (Set Point)

Direct : Direct ou Decrease

(+) : Directe

Consigne interne : L ou Local

Consigne externe :D ou R (Distance ou Remote)

Consigne suiveuse :PVT (Process Variable Tracking)

I : Inverse ou Increase

(-) : Inverse

Bibliographie

[1] Jean-Pierre Richard, Analyse et régulation des processus industriels: Régulation continue ;

Editions [TECHNIP](#) 1993

[2]P. Chauveau, J-C. Chauveau, Systèmes asservis linéaires ;

Edition [Casteilla](#) 1998

[3]Chapitre identification;

didier.magnon.free.fr/cours/chapitre%20identification.pdf

[4][BATdefFICHE 25](#) ;

www.mesures.com/archives/FICHE%2025.pdf

[5]CHAPITRE I Modélisation de processus et estimation des paramètres d'un modèle ;

www.neurones.espci.fr/Theses_PS/OUSSAR.../03_CHAPITRE_1.pdf

[6] Régulation automatique ;

<http://www.polytech-lille.fr/cours-regulation-automatique/sc00a.htm>

[7] Régulation analogique ;

eduscol.education.fr/rnchimie/gen_chim/regulation/rhode/reg_ana.pdf

[8]Modes de fonctionnement du régulateur ;

mechain.lyc.ac-amiens.fr/spip.../3-_mode-fonctionnement-regulateur.pdf