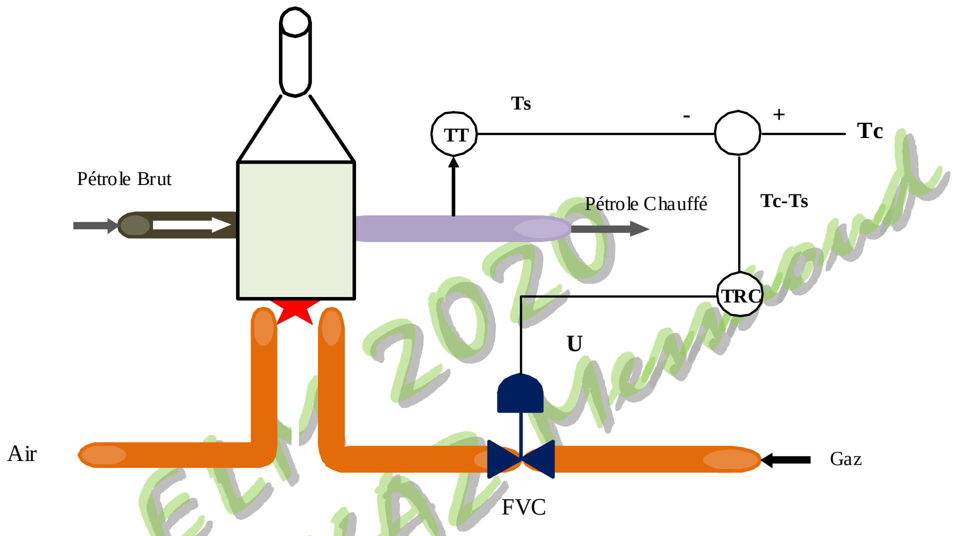
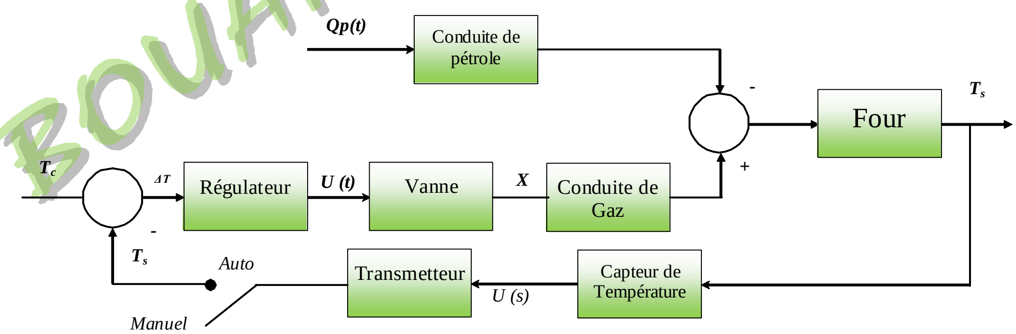
1. Régulation de température



1.2. Schéma fonctionnel du système de régulation



On définit d'abord les entrées-sortie : les variables à régler, régnantes et de perturbations :

- *Ts(t)* Grandeur de sortie (température à la sortie - c'est la grandeur à régler), valeurs maximales et minimale de la variation de température : $\boldsymbol{Ts_{max}}$ = 150°c, $\boldsymbol{Ts_{min}}$=10 °c ; $\boldsymbol{Ts_o}$ valeur nominale de la température le fonctionnement ***Tso*** = 70 °C
- Pg (t) Grandeur d'entrée (pression du gaz combustible - Grandeur réglante); valeurs maximales et minimale de la variation de la pression du gaz combustible : $\boldsymbol{Pg_{max}}$ = 5 bars, $\boldsymbol{Pg_{min}}$ = 0 bar ; $\boldsymbol{Pg_o}$ valeur nominale de la pression du gaz combustible $\boldsymbol{Pg_o}$ = 2 bars ;
- ***Qp*** Débit du pétrole à l'entrée (perturbation); débit nominale du pétrole à l'entrée: 15 ; $\boldsymbol{Qp_{max}}$ = 30 $m^{3}\cdot s^{-1}$, $\boldsymbol{Pg_{min}}$ =10 $m^{3}\cdot s^{-1}$.

Il existe aussi d'autres perturbations (pouvoir calorifique du gaz, température ambiante etc...) que nous considérons comme constantes.

- ***x*** : déplacement du clapet de la vanne [0 5mm].

- ***U*** : sortie du régulateur pneumatique [0,2 1 bar]; valeur nominale (0,6 bar)

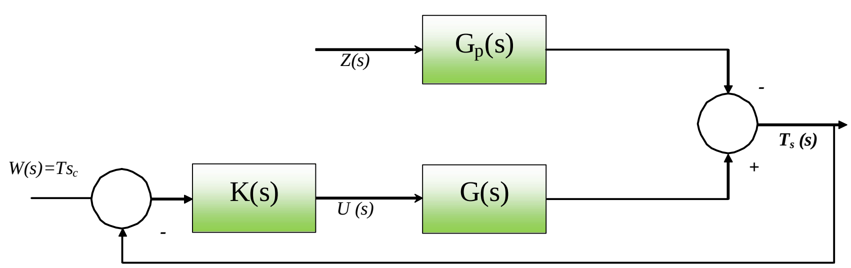
Influence des perturbations :

- Grâce à la propriété de superposition des systèmes linéaires, on peut étudier séparément l'influence des perturbations et de la commande sur la sortie du système. Ici pour simplifier la démarche on analyse uniquement une seule perturbation, celle du débit d'entrée du pétrole.

1. En boucle ouverte (sans correction) : La sortie subit l'influence de la commande (ici en manuelle) et celle de la perturbation (***$Q_p(s)$***) avec un signe (-) car l'augmentation du débit provoque la diminution de la température (le produit arrive à une température plus basse que celle du four)

$$T_s = G(s).U(s) - G_p(s).Q_p(s)$$

En boucle fermée (avec régulateur)



$$T_s = \frac{K(s).G(s)}{1 + K(s).G(s)}.T_c(s) - \frac{G_p(s)}{1 + K(s).G(s)} Q_p(s)$$

1.2.1 Choisir du cahier des charges

Le point de départ de n'importe quel projet est le cahier de charge. Pour un système de régulation, les spécifications restent souvent vagues en raison surtout de la grande diversité de problèmes de régulation. Les critères qualitatifs à imposer dépendent d'abord de la nature du processus à régler. A titre d'exemple, on ne peut imposer aveuglément un processus transitoire rapide ou un taux d'amortissement de 0,75 pour n'importe quel système. En effet l'asservissement d'un ascenseur (qui nécessite un confort pour les passagers) ne tolère pas par exemple d'accélération. Les dépassements de la pression régulée dans un réacteur nucléaire ne doivent pas atteindre les seuils limites de tarage des soupapes de sécurité etc...

Cahier de charge

Les critères de performances classiques

- **Stabilité:** Cette condition est impérative mais avec une certain degré de stabilité (marge de sécurité). En général on impose une marge de gain de 2 à 2.5. L'utilisateur parle en terme de «pompage».
- **Précision** : L'exploitant demande à ce que le système possède une bonne précision en régime permanent d'où une nécessite de mettre un PI régulateur ou d'afficher un gain important dans le cas d'un P régulateur.
- **Rapidité :** On demande en pratique que le système soit capable rapidement de compenser les perturbations et de bien suivre la consigne.
- **Dépassement :** En général on recommande une régulation dont le régime transitoire soit bien amorti et dont le dépassement ne dépasse pas 5 à 10% la valeur nominale.

Dans notre cas : on exige à ce que la température de sortie soit égale à celle de consigne et que les perturbations soient entièrement compensées. Le régime transitoire doit être assez rapide en raison de la grande inertie du four et bien amortie (5 à 10)

1.3. Identification des processus :

- **Définition:**

L'identification d'un système c'est la détermination de son modèle mathématique sur la base des observations expérimentales entrées-sorties. Le traitement mathématique des réponses graphiques du système est appelé **identification,** le modèle obtenu est dit de conduite ou de représentation

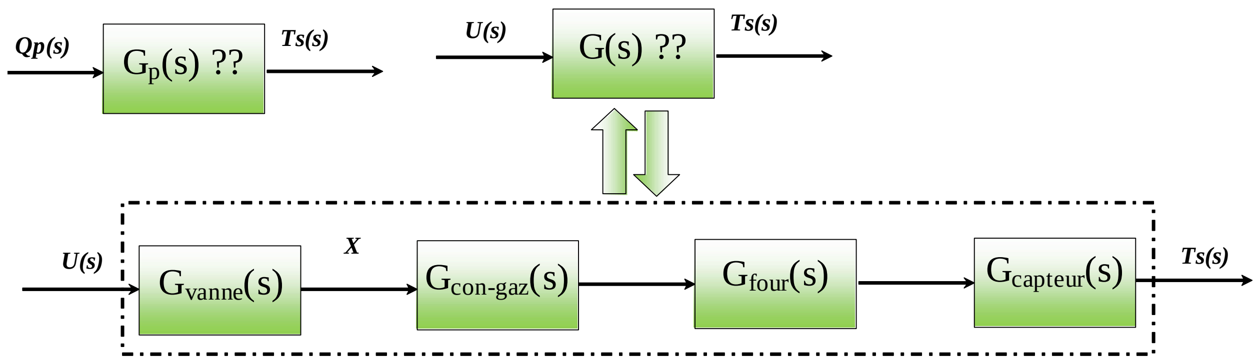
- **Principe**

1. Étape qualitative: Sur la base d'une connaissance à priori du système à identifier, on fixe une structure du modèle comportant des coefficients inconnus.

2. Étape quantitative: Elle consiste à la détermination des coefficients inconnus du modèle de façon que la différence entre les sorties réelles du système et celles du modèle soit minimale selon un critère donné qu'on résout par un algorithme d'identification.

1.3.1. Problématique pour le système étudié :

- **Détermination de la fonction du transfert :**



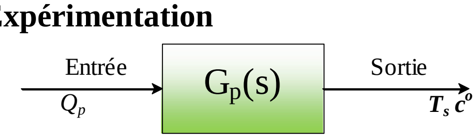
- **Expérimentation :**

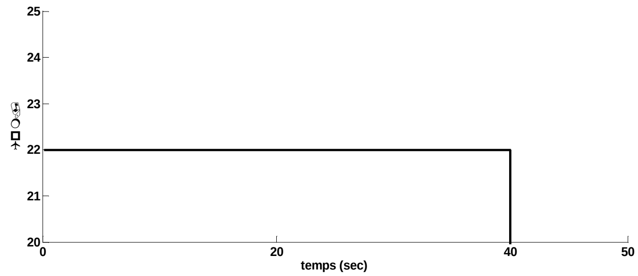
Dans cette partie, on utilise les méthodes s'appuyant sur les propriétés graphiques des réponses fondamentales (indicielle). Ces méthodes sont très utilisées par les spécialistes de régulation et des servomécanismes car elles fournissent une précision suffisante et ne nécessitent pas l'utilisation d'un outil mathématique compliqué. On peut traiter aussi bien la réponse indicielle, impulsionnelle qu'harmonique, mais l'un des signaux d'excitation le plus fréquent a mettre en œuvre est l'entrée en échelon. L'amplitude de l'échelon doit être choisie telle que le système ne sorte pas du domaine linéaire d'une part et les observations mesurables d'autre part.

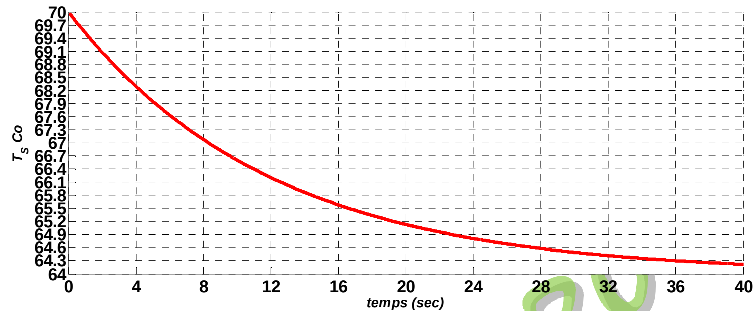
- **Méthodologie :**

1. Dans un système de régulation en fonctionnement, le correcteur est d'abord mis en fonctionnement manuel. On attend que le système soit bien stabilisé
2. On applique au système un signal en échelon de + ou -10% de la valeur nominale de fonctionnement (afin de ne pas trop perturber le système). L'échelon d'entrée peut représenter le déplacement du clapet de la vanne. La réponse est enregistrée à la sortie du transmetteur dont les mesures doivent être choisies de façon que la réponse soit exploitable. Le modèle de conduite (ou la fonction de transfert) à déterminer du traitement de la réponse graphique décrit l'ensemble des systèmes (vanne, objet, capteur, transmetteur)

1.3.2. Identification de $G_p(s)$: Expérimentation







Solution :

A partir de la réponse indicielle (voir ci-dessous) du système industriel, dont le signal de commande subit une variation en échelon **ΔQp** 10% de la variation du débit du pétrole, on se propose de modéliser la fonction de transfert ***$G_p(s)$*** de ce système par $G_p(s) = \dfrac{K}{1+\tau s}$.

$$K = \frac{\Delta Y}{\Delta U} = \frac{(Ts_\infty - Ts_0)}{(Qp_\infty - Qp_0)} = \frac{70-64.2}{22-20} = 2.9C^o.S/m^3$$

$$\begin{matrix} 5.8C^0 \longrightarrow 100\ \% \\ TsC^o \longrightarrow 63\ \% \end{matrix} \Rightarrow Ts = \frac{5.8\times 63}{100} = 3.65\ C^o \Rightarrow Ts\ 63\ \% = 66.35\ C^o$$

De la réponde indicielle $66.35\ C^o \mapsto 12\ \sec \Rightarrow G_p(s) = \dfrac{2.9c^os/m^3}{1+12s}$

Le gain relatif $\mapsto K = \dfrac{\frac{\Delta Ts}{\Delta Ts_{\max}}}{\frac{\Delta Qp}{AQp_{\max}}} = \dfrac{\frac{5.8}{150-10}}{\frac{2}{30-10}} \Rightarrow K = 0.41 \Rightarrow G_p(s) = \dfrac{0.41}{1+12s}$

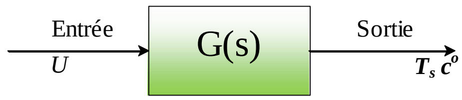
On détermine alors l'erreur relative maximale qui doit être inférieure à 10%.

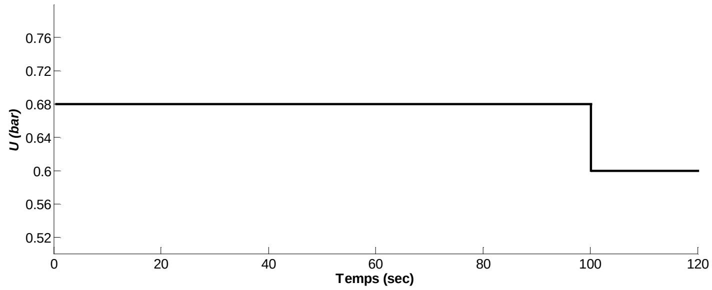
En générale il est commode de prendre un gain unitaire (cela n'influe pas évidemment sur le résultat).

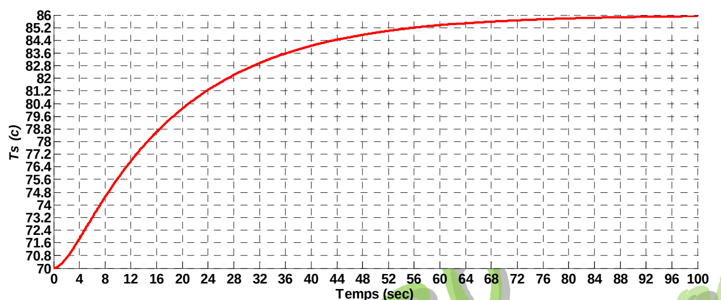
Pour avoir la sortie en ***c^o*** on multiplie par la valeur maximale soit 140 ***c^o***

$$Ts(t) = L^{-1}\left\{\frac{0.1}{s}\times\frac{0.41}{12s+1}\right\} = \frac{1}{30-10}(0.1\times 0.41\times 140)\left(1-e^{-\frac{1}{12}t}\right)\% \Rightarrow Ts(t) = \frac{0.1\times 0.41\times 140}{20}\left(1-e^{-\frac{1}{12}t}\right)+70C^o$$

1.3.3. Identification de *G(p):* Expérimentation :







Solution :

A partir de la réponse indicielle (voir ci-dessous) du système industriel, dont le signal de commande subit une variation en échelon ΔU 10% de la variation du débit du pétrole, on se propose de modéliser la fonction de transfert ***G(s)*** de ce système on propose d'utiliser le modèle de Broïda $G(s)=\dfrac{Ke^{-\tau}}{1+\tau s}$.

$$k=\frac{\Delta Ts}{\Delta U}=\frac{16}{0.08}=200C^o/bar$$

On a

$$\Delta U_{max}=1-0.2=0.8\Rightarrow 2\%=\frac{0.8\times 2}{100}=0.08bar$$

$$\Rightarrow y28\%=\frac{16\times 28}{100}=4.48 \qquad 16 \longrightarrow 100\% \qquad Ts \longrightarrow 28\%$$

$$\Rightarrow y40\%=\frac{16\times 40}{100}=6.4$$

De la réponse indicielle :

$$t_{40\%}=11.95\sec$$
$$t_{28\%}=8\sec$$

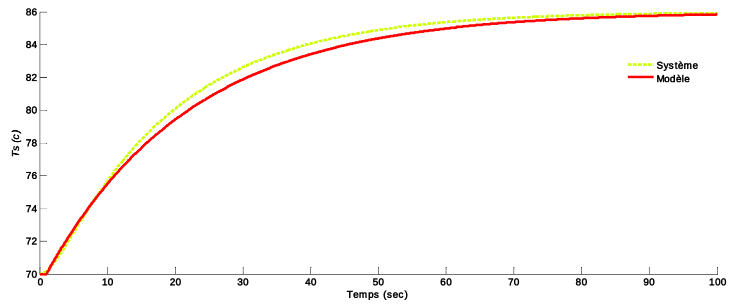
$$T=\left(2.8\times t_{28\%}-1.8*t_{40\%}\right)=2.8\times 8-1.8\times 11.9=0.98$$

$$\tau=5{,}5\left(t_{40\%}-t_{28\%}\right)=5.5(26-22.5)=21.45$$

$$G(s)=\frac{200e^{-Ts}}{1+\tau s}\approx\frac{200e^{-0.98s}}{1+21.45s}$$

Le gain relatif

$$\mapsto K = \frac{\frac{\Delta Ts}{\Delta Ts_{max}}}{\frac{\Delta U}{AU_{max}}} = \frac{\frac{16}{150-10}}{\frac{0.08}{1-0.8}} \Rightarrow K = 1.14 \Rightarrow G(s) = \frac{1.14\, e^{-0.98}}{1+21.45\, s}$$



$$G(s) = \frac{1.14e^{-0.98s}}{1+21.45s} \cong \frac{-1.14(0.49s-1)}{(21.45s+1)(0.49s+1)}$$

1.4.Modèle du système global à commander :

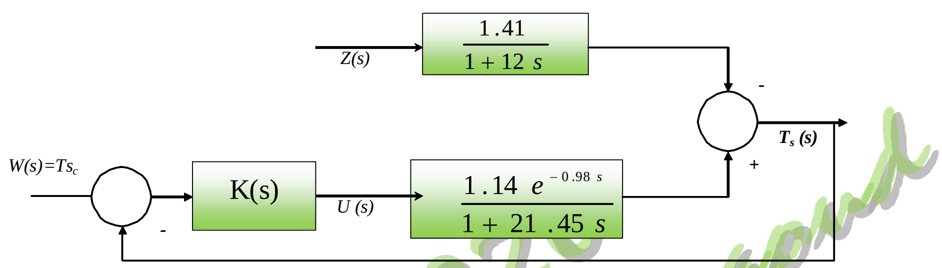
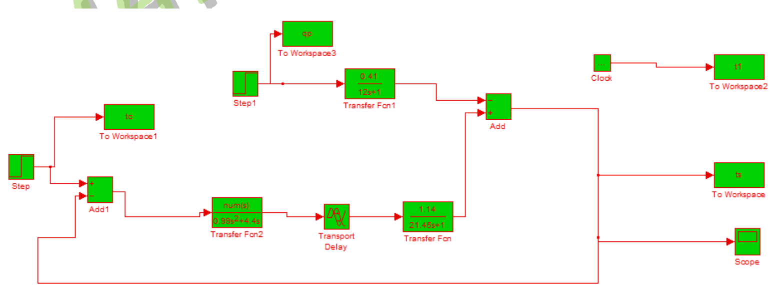
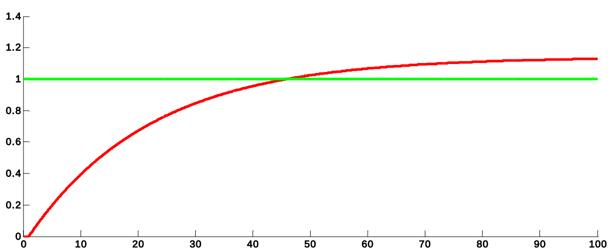
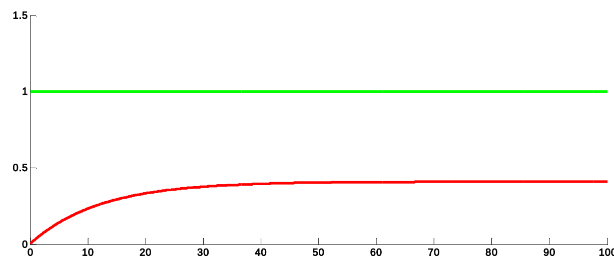


Schéma de simulation sur Matalab-simulink : Afin d'analyser aussi l'influence du retard sur les performances du système, on insère sur le schéma de simulation un bloc de retard pur (Transport delay). On peut utiliser la fonction « ***tf*** » pour simuler le système avec retard pur de la manière suivante :

sys = tf(1.41,[20.45 1],'Inputdelay',0.98), et la fonction « **pade**» pour approximer le modèle **syse=pade(sys,1)**







1.5. Objectifs de la régulation:

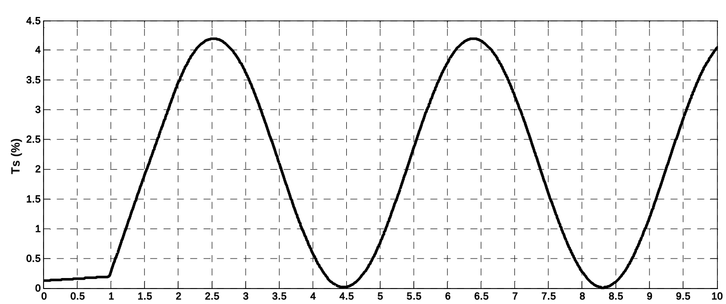
1. Eliminer les perturbations (ici le débit du produit à chauffer), mais aussi toutes les perturbations en réalité, puisque elles agissent toutes sur la sortie

2. «Bien» suivre la consigne , «bien», cela signifie sans trop de dépassement (5 à 10%), un système rapide, une erreur statique nulle et surtout un système en boucle fermée assez stable (***MG***=2 par exemple)

1.6. Méthode pratique de réglage du régulateur en boucle fermée :

On introduit un retard pur au système (sinon le système ne sera jamais en régime de pompage). Sur le schéma de simulation sur Simulink du système, on met le correcteur en action P ($\boldsymbol{T_i}$=max, $\boldsymbol{T_d}$=0 ou I=0, D=0 sur le PID controller de Simulink) et on augmente le gain jusqu'à apparition du pompage, on fixe alors le gain critique K_{po} et la période de l'auto-oscillation puis on détermine les paramètres du régulateur par la méthode de Ziegler et Nichols selon le tableau suivant:

Type	K_p	T_i	T_d
P	0.5. K_{p0}	max	0
PI série	0.45.K_{p0}	0.83. T_{p0}	0
PI parallèle	0.45.K_{p0}	2 .T_{p0}/ K_{p0}	0
PID série	0.30.K_{p0}	0.25 T_{p0}	0.25.T_{p0}
PID parallèle	0.6.K_{p0}	0.85.T_{p0}/ K_{p0}	K_{p0}.T_{p0}/13.3
PID mixte	0.6.K_{p0}	0.5 .T_{p0}	0.125.T_{p0}



Obtention du régime de pompage :

La valeur de $\boldsymbol{K_{p0}}$ est 30.72 et $\boldsymbol{T_{p0}}$=5.4-1.5=3.9

Type	K_p	T_i	T_d
P	15.36	max	0
PI série	13.83	3.24	0
PI parallèle	13.83	0.25	0
PID série	9.22	0.97	0.97
PID parallèle	18.43	0.11	9
PID mixte	18.43	1.95	0.49

PI parallèle

$$K(s)=\frac{U(s)}{\varepsilon(s)}=K_p+\frac{1}{T_i s}$$

PID parallèle

$$K(s)=\frac{U(s)}{\varepsilon(s)}=K_p+\frac{1}{T_i s}+T_d s$$

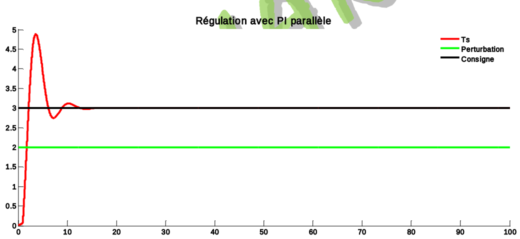
Le PID théorique un inconvénient c.-à-d. une amplification en hautes fréquences ⇒ sensibilité aux bruits. Pour éviter cela, on introduit un filtre passe-bas en hautes fréquences

PID parallèle avec action dérivée filtrée

$$K(s)=\frac{U(s)}{\varepsilon(s)}=K_p+\frac{1}{T_i s}+\frac{T_d s}{1+\frac{T_d s}{N}},N\geq 10$$

PID parallèle

$$K(s)=\frac{U(s)}{\varepsilon(s)}=13.83+\frac{1}{0.25_{i}s}=\frac{13.83\times 0.25.s+1}{0.25.s}=\frac{3.46.s+1}{0.25.s}$$



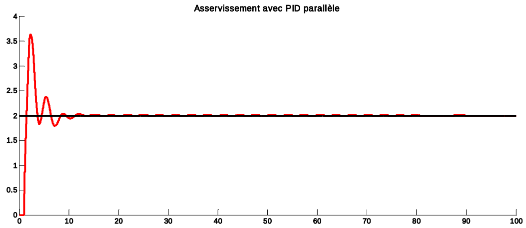
PID parallèle avec action dérivée filtrée

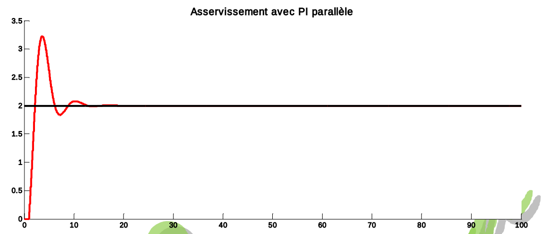
$$K(s)=\frac{U(s)}{\varepsilon(s)}=18.43+\frac{1}{0.11.s}+\frac{9.s}{1+\frac{9s}{N}},N\geq 10\Rightarrow K(s)=18.43+\frac{1}{0.11.s}+\frac{N.9.s}{N+9s}=$$

$$\frac{18.43(0.11.s).(1+9s)+(N+9s)+0.11.s.N.9s}{0.11\times 9s^2+0.11Ns}$$

$$K(s)=\frac{18.43(0.11.s).(N+9s)+(N+9s)+0.11.s.N.9s}{0.11\times 9s^2+0.11Ns}=\frac{(0.99N+18.25)s^2+(2N+9)s+N}{0.99s^2+0.11Ns}$$

$$SiN=40\Rightarrow K(s)=\frac{(0.99N+18.25)s^2+(2N+9)s+N}{0.99s^2+0.11Ns}=\frac{57.85s^2+89s+40}{0.99s^2+4.4s}$$





PID mixte

$$K(s)=\frac{U(s)}{\varepsilon(s)}=K_p\left(1+\frac{1}{T_i s}+\frac{T_d s}{1+\frac{T_d s}{N}}\right)=K_p+\frac{K_p}{T_i s}+\frac{K_p.T_d s}{1+\frac{T_d s}{N}}=K_p+\frac{K_p}{T_i s}+\frac{K_p.T_d s}{\frac{N+T_d s}{N}}$$

$$K(s)=K_p+\frac{K_p}{T_i s}+\frac{N.K_p.T_d s}{N+T_d s}=\frac{K_p(T_i s)(N+T_d s)}{(T_i s)(N+T_d s)}+\frac{K_p(N+T_d s)}{T_i s(N+T_d s)}+\frac{(T_i s)N.K_p.T_d s}{(T_i s)(N+T_d s)}$$

$$K(s)=\frac{K_pT_iN.s+K_pTT_d.s^2+K_pN+K_pT_d.s+T_iN.K_p.T_ds^2}{(T_i s)(N+T_d s)}=\frac{(K_pT_iT_d+T_iN.K_p.T_d).s^2+(K_pT_iN+K_pT_d).s+NK_p}{T_iT_d.s^2+NT_i.s}$$

$$K(s)=\frac{722.s^2+1446.6.s+737.2}{0.96s^2+19.6.s}$$

Travail demandé :

- Analyser les réponses indicielles du système par rapport à la consigne et à la perturbation en boucle ouverte sans régulateur.
- Etudier l'influence de chaque action d'un régulateur PID sur les performances du système (stabilité, rapidité et précision.
- **Réglage du correcteur : méthodes pratiques**
  - Discuter les résultats obtenus par la méthode de réglage en boucle fermée.
  - Calculer les paramètres du régulateur PID par la méthode de réglage en boucle ouverte et discuter les résultats obtenus ?
- **Réglage du correcteur : méthodes théoriques**

On impose les performances suivantes:

- Précision statique parfaite
- Dépassement indiciel maximal inférieur à 5%
- Temps de réponse à 5% de l'ordre de 1.5s

Calculer le régulateur PID