Université Sidi Mohammed Ben Abdellah
Ecole Supérieure de Technologie
Filière Génie thermique et Energétique
Deuxième année
Route d'Immouzer Bp 2427
Fès -Maroc

Travaux dirigés de régulation industrielle analogique

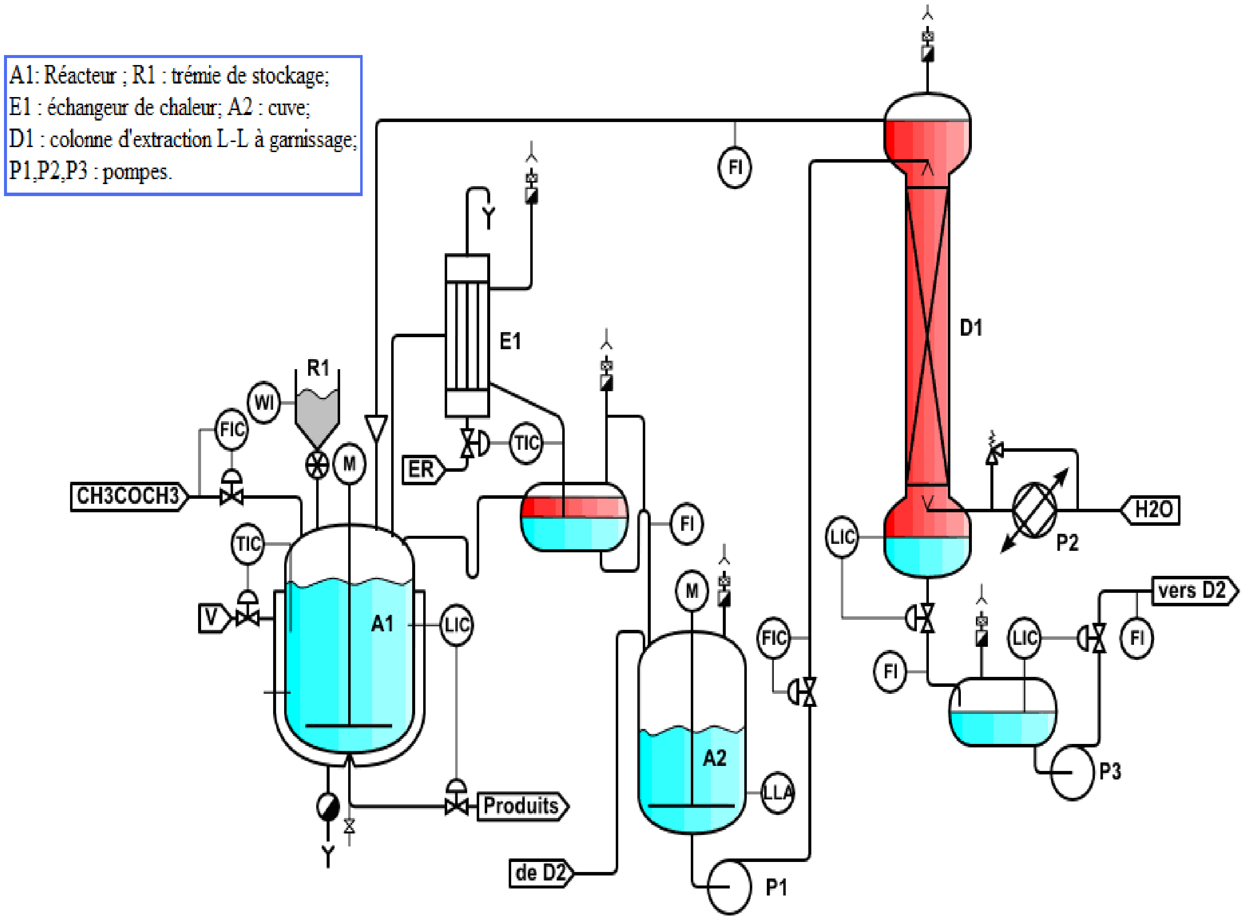
Enseignant : Dr. Ing.M. Rabi

Exercice 1 :

Exercice sur la symbolisation en régulation industrielle

La figure ci-dessous présente le schéma ou Flow-sheet d'un procédé de fabrication du trichlorométhane. Pour le bon fonctionnement de ce procédé, il est équipé de certains instruments de mesure et de régulation. Identifier les tous et indiquer pour chaque boucle de régulation : la grandeur réglée, réglante la(les) perturbation(s).

A1: Réacteur ; R1 : trémie de stockage;
E1 : échangeur de chaleur; A2 : cuve;
D1 : colonne d'extraction L-L à garnissage;
P1,P2,P3 : pompes.



Exercice 2: Schéma bloc d'un procédé

Donner le schéma bloc de chacun des procédés des figures 1,2 et 3.

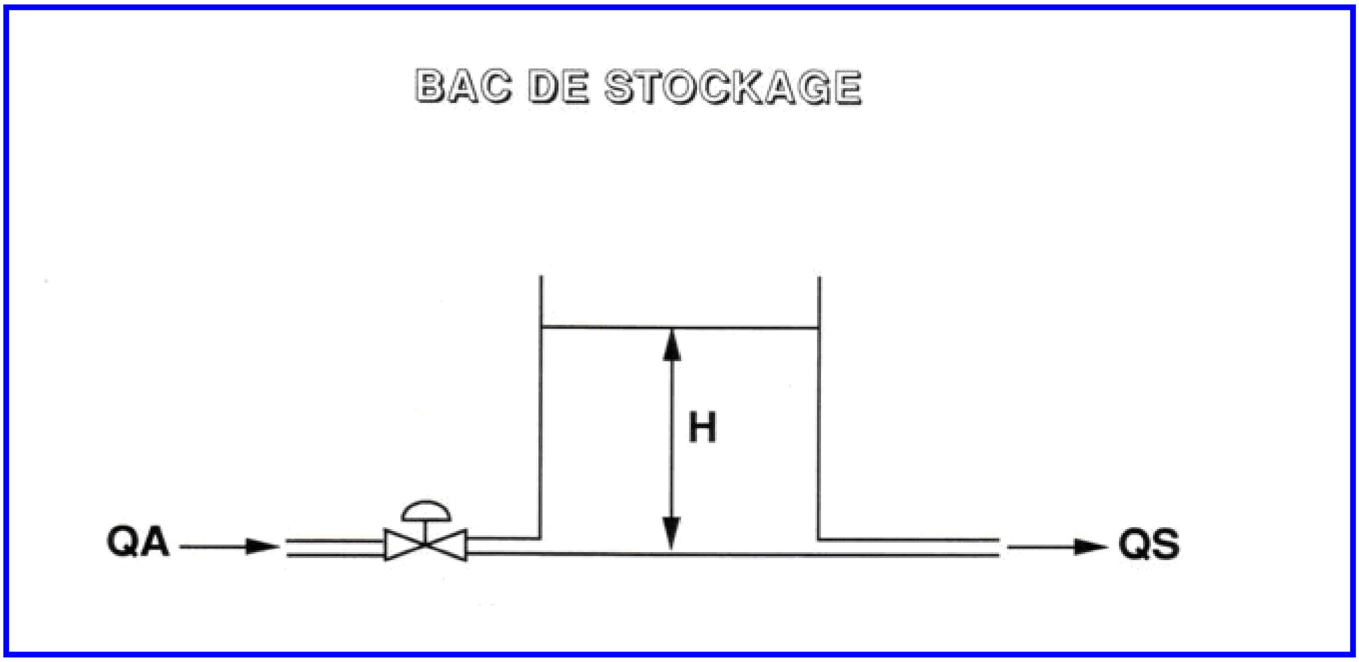


Figure 1

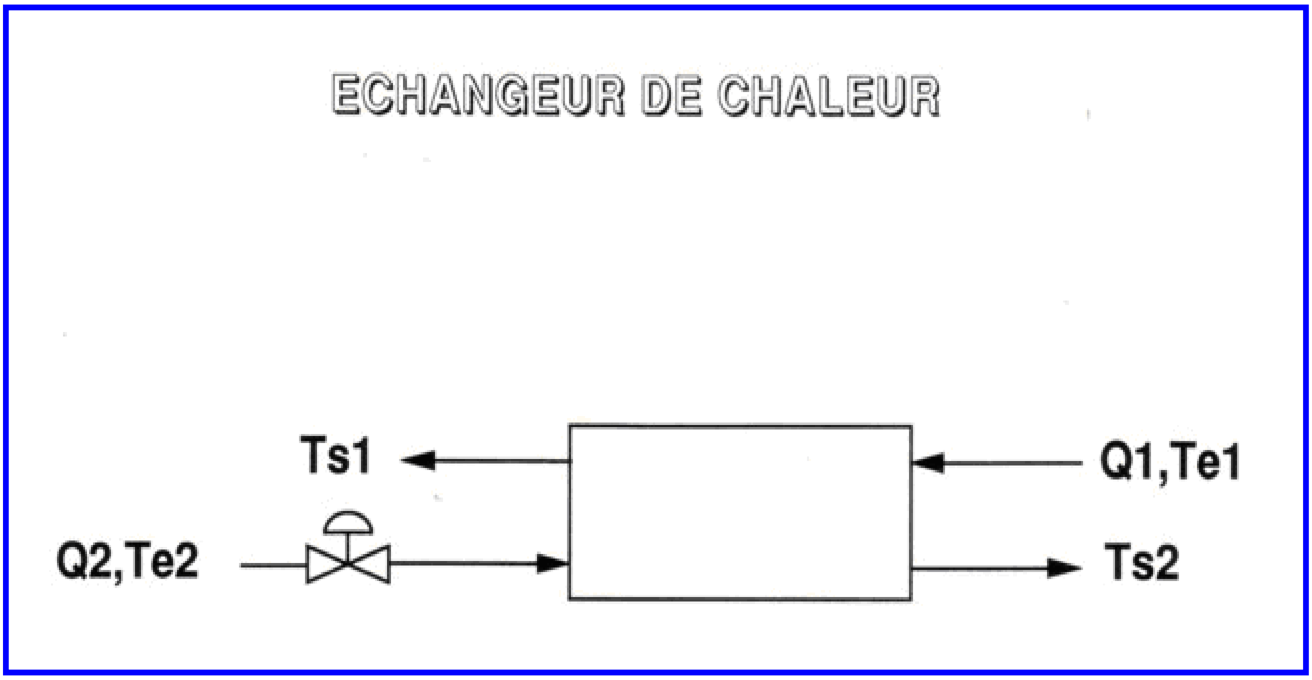


Figure 2

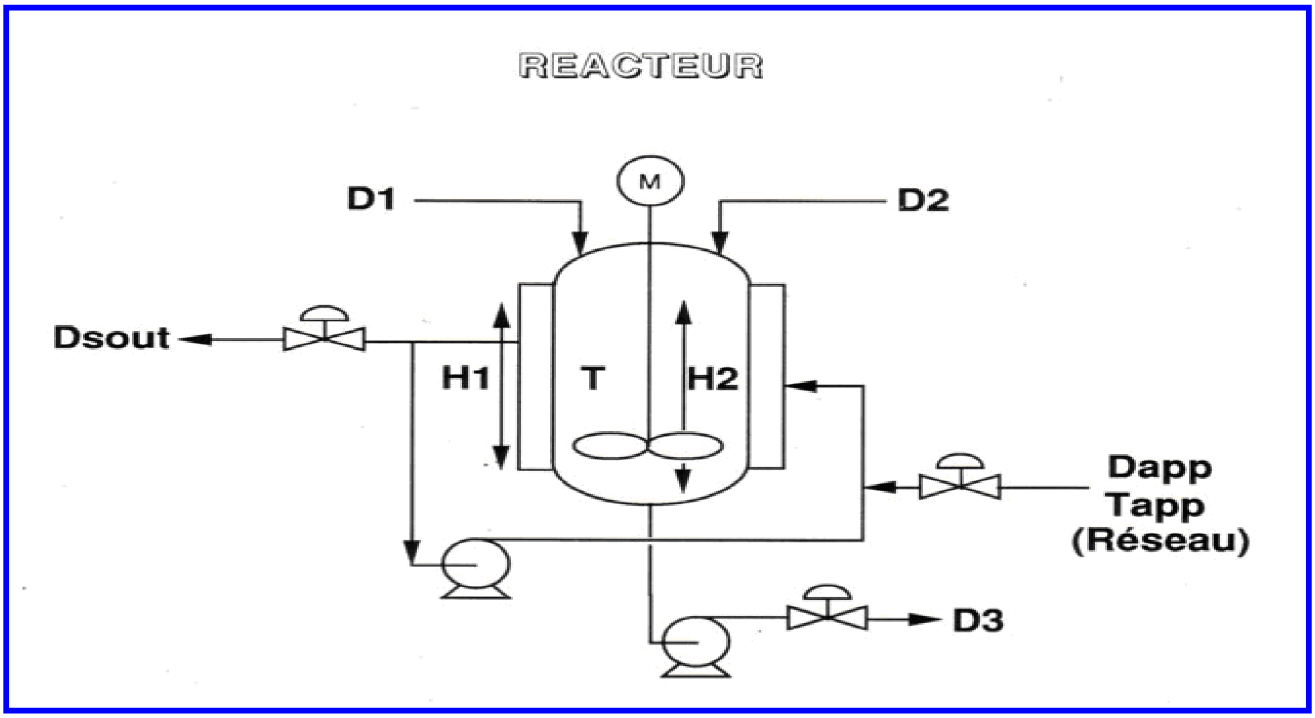


Figure 3

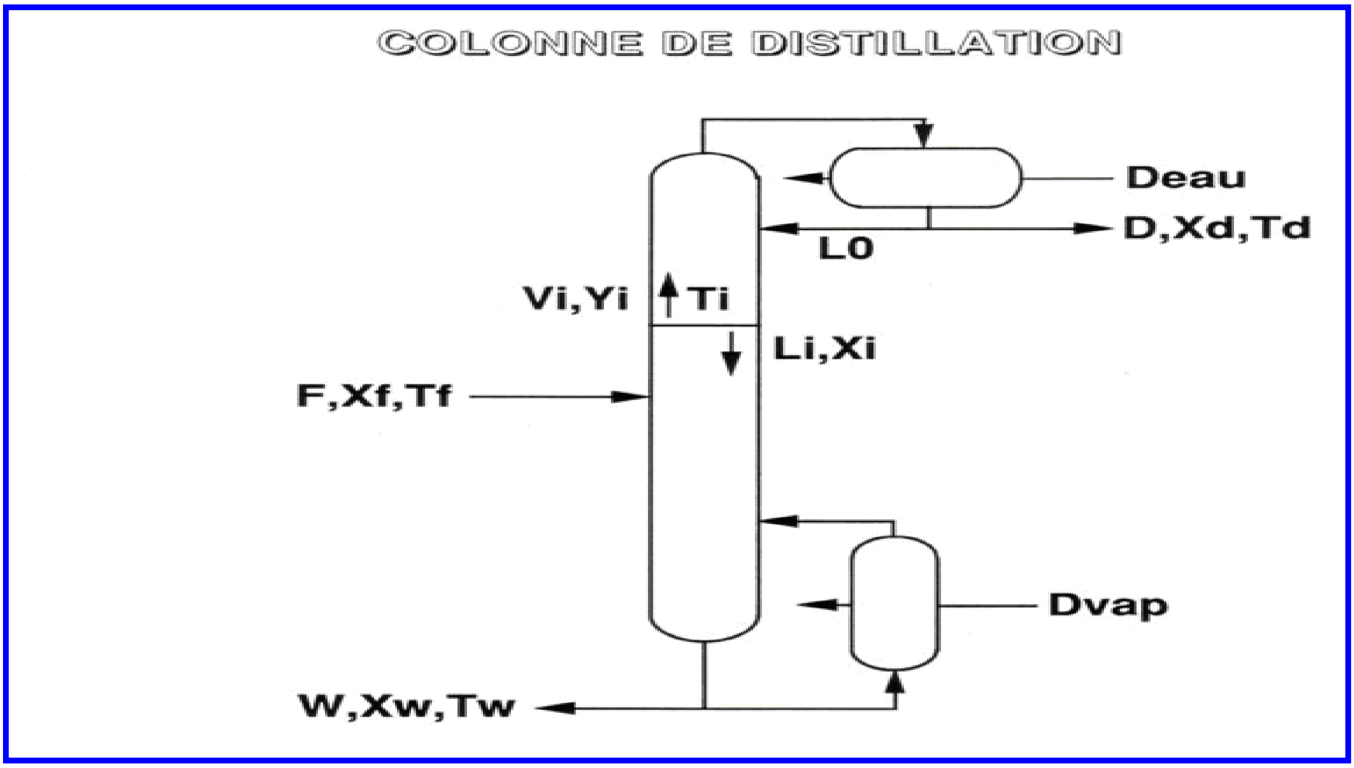


Figure 4

Exercice 3 : *Modélisation de deux Cuves thermiques en série avec recyclage*

Considérons le procédé des deux cuves thermiques en série déjà vu en cours (chap.3) avec en plus maintenant un flux de recyclage vers la première cuve et dont lé débit est égal à 20% du débit total de sortie (Figure 1.1).

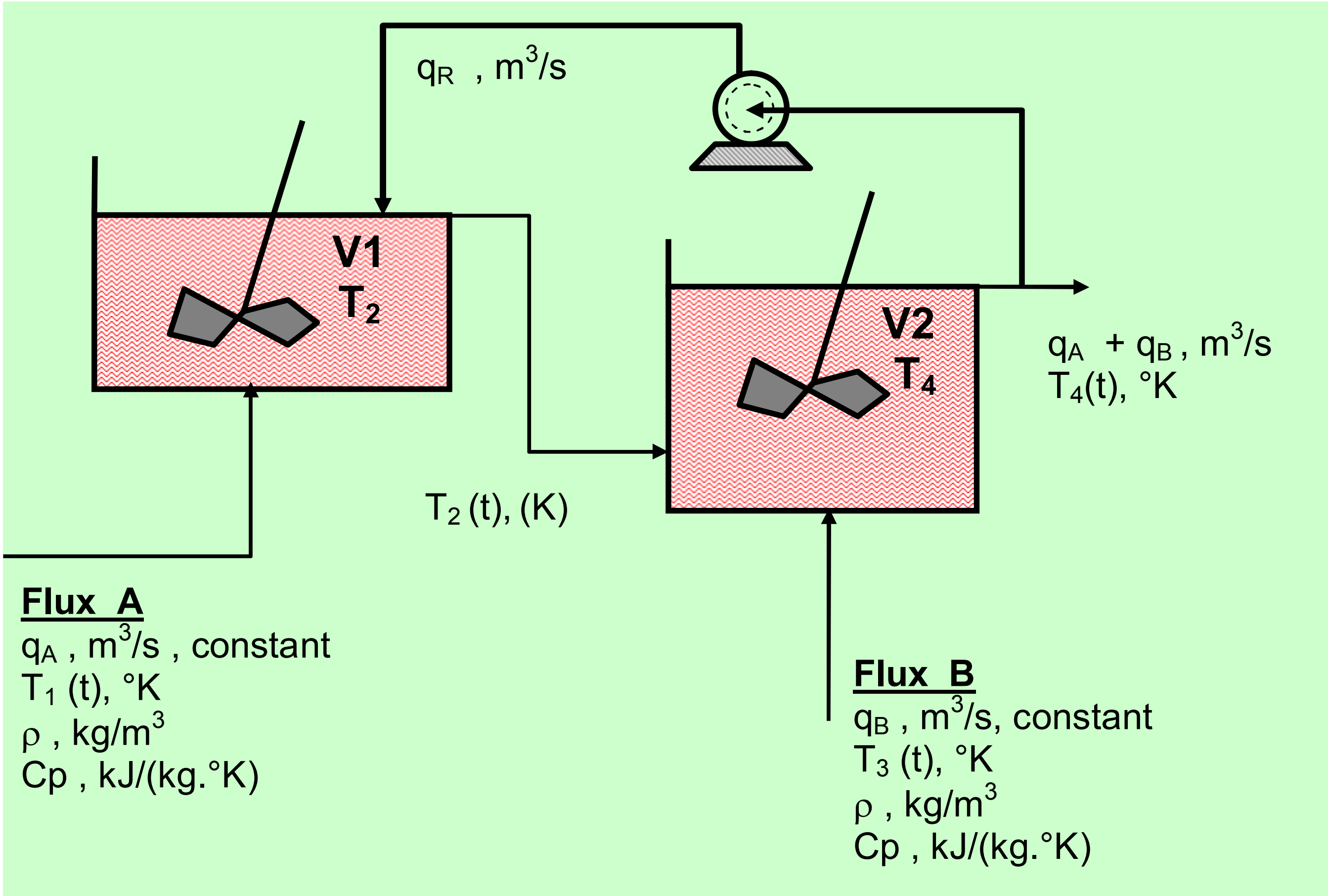


Figure 1.1: Cuves thermiques en séries avec recyclage

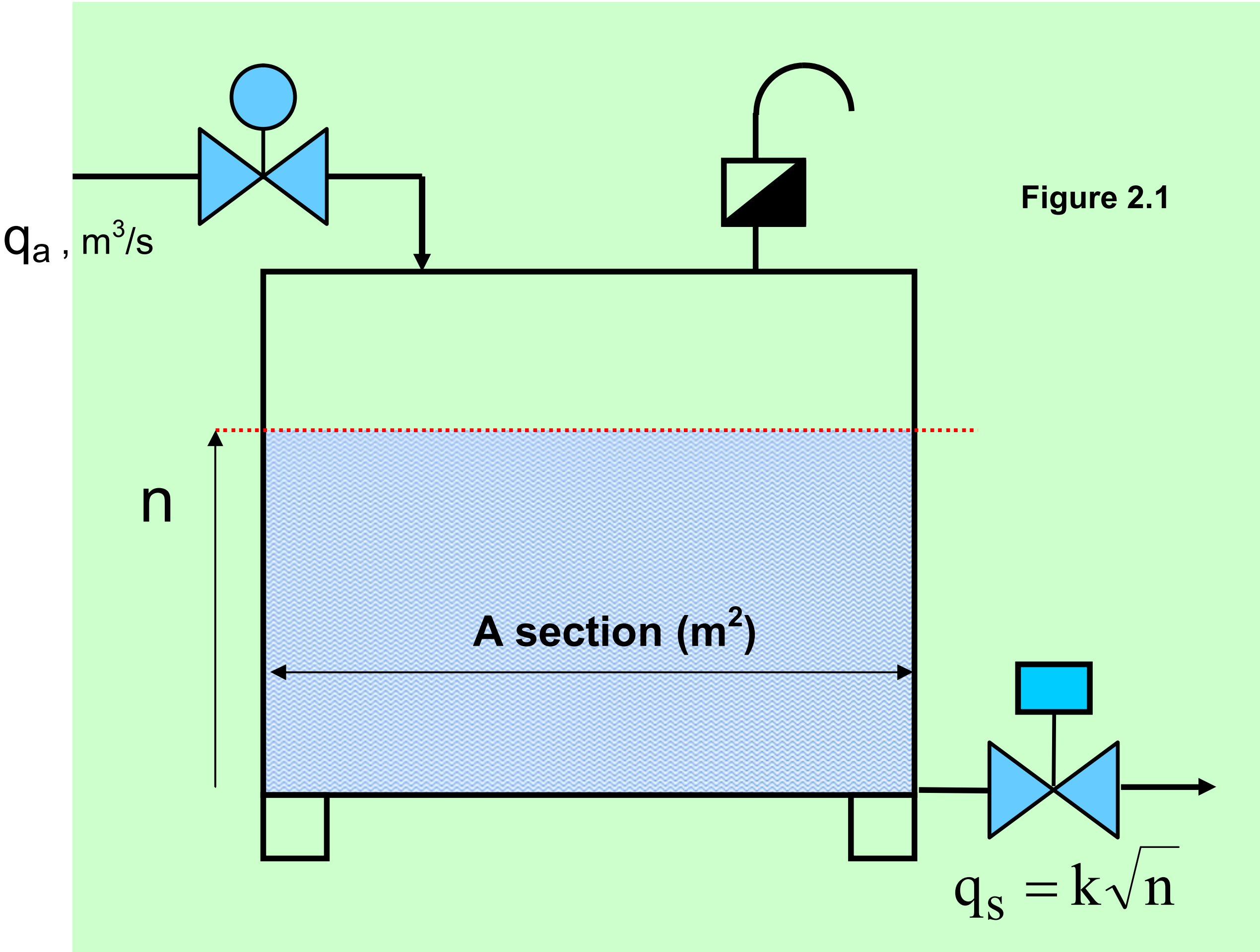
Retrouver les fonctions de transfert liants T_4 à T_1 et T_4 à T_3.

$$H_{41}(s) = \frac{\Gamma_4(s)}{\Gamma_1(s)} \quad \text{et} \quad H_{43}(s) = \frac{\Gamma_4(s)}{\Gamma_3(s)}$$

Exercice 4 : *linéarisation d'un procédé non linéaire*

On considère une cuve d'eau dont on souhaite réguler le niveau (Figure 2.1). Le débit d'entrée q_a est réglable et le débit de sortie q_s dépend de niveau selon une loi non linéaire

$q_s = k\sqrt{n}$. 1/k est la résistance du robinet.



1. Etude statique.

Après avoir fait varier q_a, on attend suffisamment longtemps pour que le régime nominal soit atteint ($q_a = q_{a0}$ et $n = n_0$) .

1.1 Quelle est la relation entre n et q_a en régime nominale ?

1.2 Représenter n en fonction de q_a, noter le point du régime nominal par M_0 (= q_{a0}, n_0).

1.3 Quelle est le gain statique en M_0 (pente de la tangente en M_0).

2. Etude dynamique.

2.1 Donner l'équation différentielle liant, en régime dynamique, les variations de q_a à celles de n. Par linéarisation de cette équation autour du régime nominal, déterminer la fonction de transfert $N(s)/Q_a(s)$.

2.2 A t = 0, q_a passe brusquement de q_{a0} à q_{a1}, calculer la réponse n(t) du niveau.

3. Effet des non-linéarités.

Calculer la valeur n_1, de nouveau régime nominal. Comparer avec la véritable valeur n_1 donnée par 1.1. Interpréter.

Exercice 5 : Identification en BO d'un second ordre : débit d'air d'un incinérateur

En vue de connaître la FT réglante H(s) de la régulation de débit d'air d'un incinérateur industriel, on met le régulateur en manuel (en partant du régime nominal) puis, on provoque rapidement un échelon de position de 40% à 52% pour la commande u (U de 0 à 12%) de la vanne automatique de régulation du débit d'air. La figure 3.1 montre l'enregistrement de la variation de la commande u(t) soit U(t) effectuée ainsi que la variation de la mesure y(t) soit Y(t) du débit qui en résulte.

1. Ce procédé est-il naturellement stable ? Justifier la réponse.
2. Des fonctions de transfert suivantes, laquelle peut être retenue pour modéliser ce procédé ? Justifier le choix effectué. Déterminer alors H(s).

$$H_1(s) = \frac{K}{1 + 2\zeta\frac{s}{\omega_0} + \frac{s^2}{\omega_0^2}} \quad ; \quad H_2(s) = \frac{Ke^{-\tau s}}{1 + 2\zeta\frac{s}{\omega_0} + \frac{s^2}{\omega_0^2}} \quad ; \quad H_3(s) = \frac{Ke^{-\tau s}}{(1+T_1 s)(1+T_2 s)}$$

$$H_4(s) = \frac{K(1-Ts)}{1 + 2\zeta\frac{s}{\omega_0} + \frac{s^2}{\omega_0^2}}$$

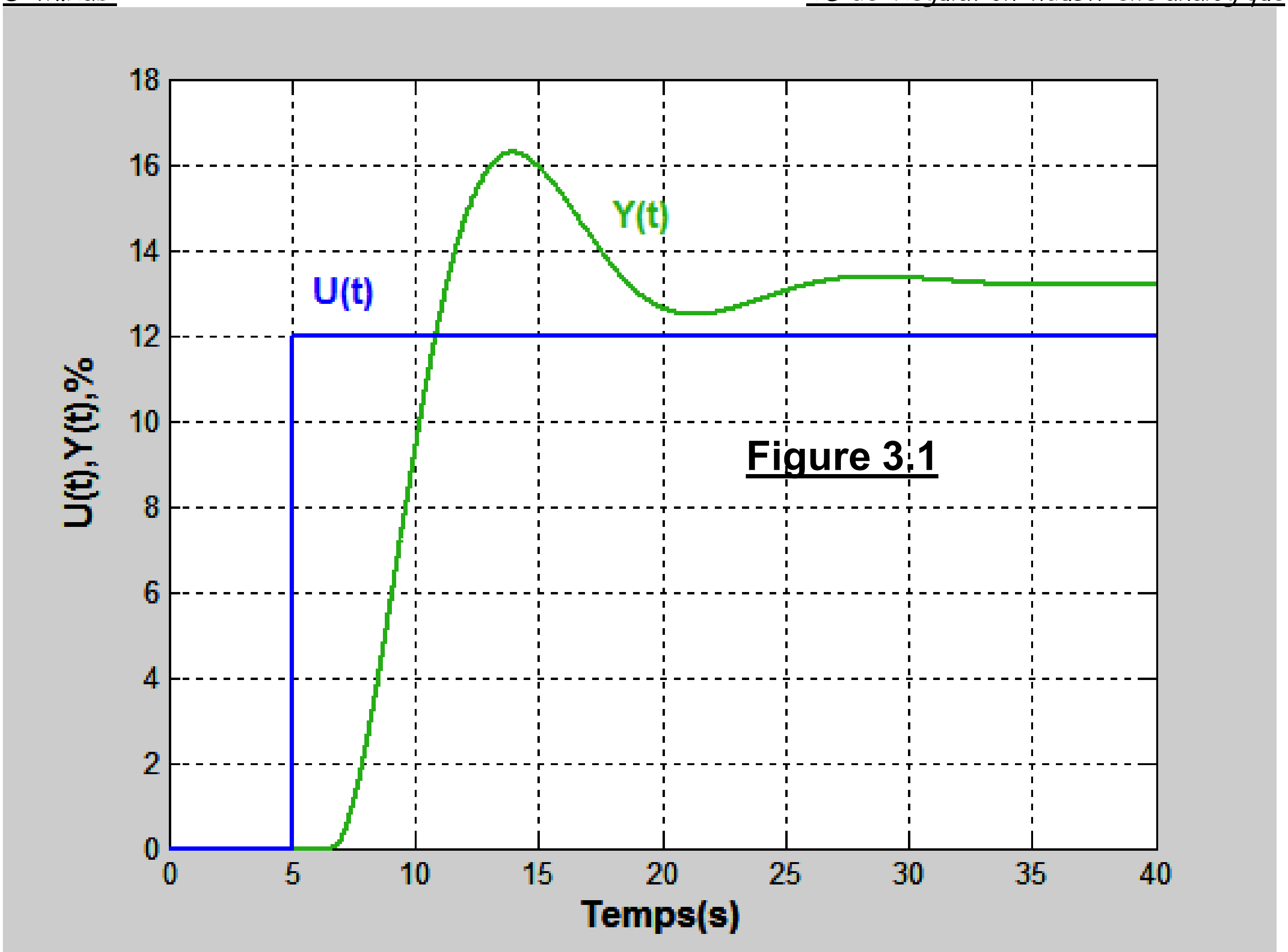


Figure 3.1

Exercice 6 : Identification d'un procédé stable en BO

On cherche à identifier la fonction de transfert réglante d'un échangeur thermique (figure 4.1). Une variation de la commande u de 44% à 60%, appliquée à l'actionneur (ici la vanne automatique) , a permis d'obtenir la réponse indicielle y(t) mesure de la température (figure (4.2).

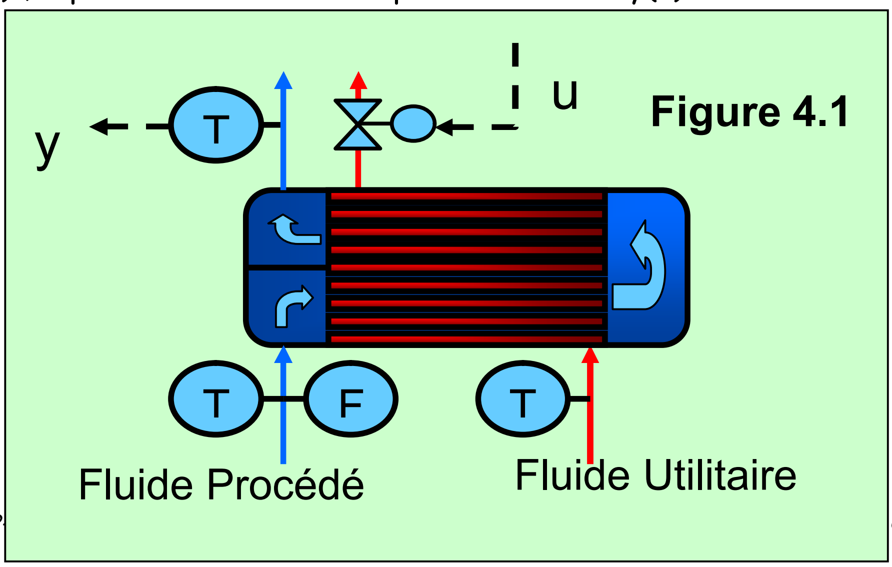


Figure 4.1

1- Donner la fonction de transfert réglante $H_1(s)= Y(s)/U(s)$ représentative de cet échangeur de chaleur en appliquant la méthode de Broïda.

2- Donner la fonction de transfert réglante $H_2(s)= Y(s)/U(s)$ représentative de cet échangeur de chaleur en appliquant la méthode de Strejc.

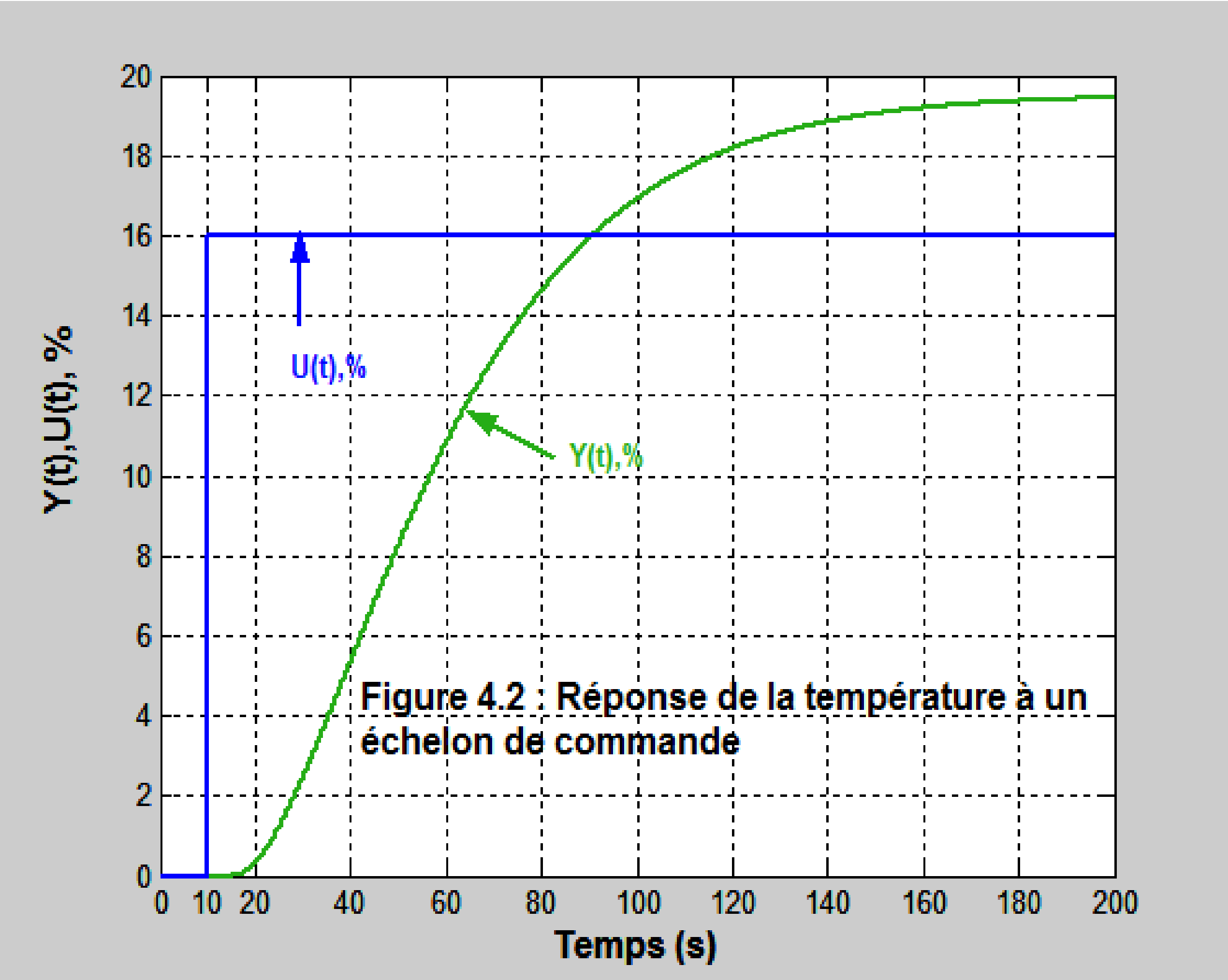
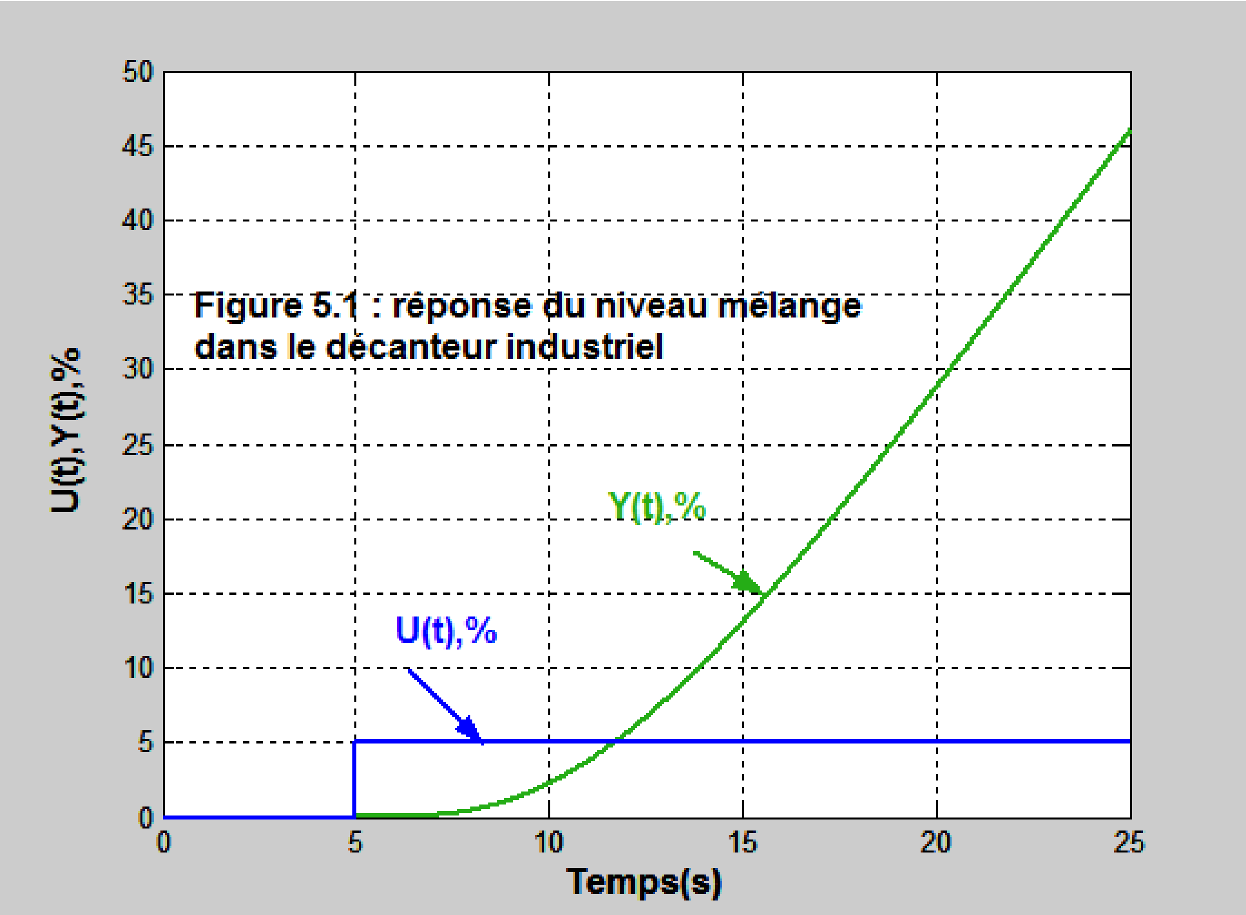


Figure 4.2 : Réponse de la température à un échelon de commande

Exercice 7 : Identification d'un procédé instable en BO

L'enregistrement de niveau d'un décanteur industriel suite à un échelon de commande de l'actionneur est reporté sur la figure 5.1.

Donner la fonction de transfert réglante $H(s)= Y(s)/U(s)$ représentative de cet décanteur en appliquant la méthode de Strejc-Davoust.



Exercice 8: Identification d'un procédé en BF : dégazeur thermique

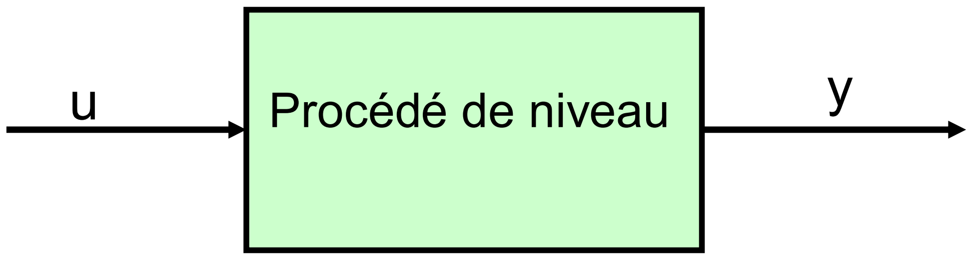
La Fonction de transfert réglante de niveau d'eau d'un dégazeur thermique à été identifiée en boucle fermée selon la méthode de pompage vue au chapitre 4 du cours. Lorsque le procédé est mis en oscillations juste entretenues, on note $K_{RC} = 5$ et $T_{osc} = 23.88$ min.

Calculer cette fonction transfert réglante en l'exprimant par :

$$H(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{k}{s\,(Ts+1)^2}$$

Exercice 9: Synthèse d'après un cahier des charges

On désire calculer les paramètres d'un procédé de niveau qui peut être modélisé par un second ordre.



1- Le cahier des charges est le suivant :

a- La sortie est égale à l'entrée en régime nominal lorsque l'entrée est un échelon.
b- Pour une entrée en rampe de pente 5.10^{-2} m/s, l'écart en régime permanent est inférieur à 5.10^{-3}m.
c- Pour une entrée en échelon, le dépassement doit être compris entre 6% et 22% et le temps de réponse à 5% inférieur à 1s.
d- On souhaite que le temps de montée soit supérieur à 0.5.

Si on peut satisfaire ce cahier des charges, donner des valeurs convenables de K, ζ et ω_0 .

2- on change la conditio d) par un temps de montée supérieur à 0.1s, les autres conditions du cahier des charges n'ayant pas changé. Reprendre la question 1.

Exercice 10: Diagramme de Bode

La FTBO d'un système asservi est donnée par : $FTBO(s) = \dfrac{177.8}{100 + 25s + s^2}$.

Ecrire H(s) sous forme : $FTBO(s) = \dfrac{K}{1 + 2\zeta \dfrac{s}{\omega_0} + \dfrac{s^2}{\omega_0^2}}$

1- Tracer le diagramme de Bode de la FTBO.
2-Calculer les deux valeurs de pulsation $\omega = \omega_3$ (pour avoir un gain de 0dB) et ω_4 (pour une phase de -135°).

3-Calculer la valeur du gain pour $\omega = \omega_4$. Quelle valeur K_R gain du régulateur permettrait d'annuler ce gain (c'est-à-dire $|FTBO(j\omega_4)|=1$)?

Exercice 11: Diagramme de Bode

Tracer les diagrammes asymptotiques (dans le lieu de Bode) des systèmes suivants :

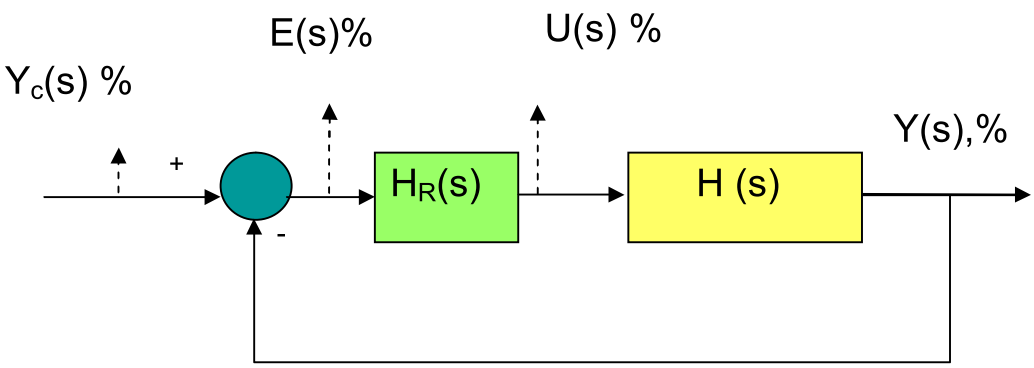
- $H(s) = \dfrac{K}{(1+Ts)}$; $H(s) = 1 + Ts$; $H(s) = \dfrac{K}{(1-Ts)}$; $H(s) = 1 - Ts$
- Second ordre de classe 1 : fonction de transfert : $H(s) = \dfrac{2}{s(1+s)}$
- Second ordre généralisé de classe 0 :

$$H(s) = \frac{(1+T_2 s)(1+T_3 s)}{(1+T_1 s)(1+T_4 s)}$$
$$\text{avec} \quad \frac{1}{T_1} \prec \frac{1}{T_2} \prec \frac{1}{T_3} \prec \frac{1}{T_4}$$

- Troisième ordre de classe 1 : $H(s) = \dfrac{10(10-s)}{s(2+s)(5+s)}$
- Quatrième ordre de classe 1 : $H(s) = \dfrac{2}{s(1+s)(1+0.1s)(1+0.01s)}$

Exercice 12: Second ordre en BF

Un procédé asservi est représenté par son schéma bloc à retour unitaire. Le régulateur est proportionnel seulement soit $H_R(s) = K_R$.



On donne $H(s) = \dfrac{50}{50 + 15s + s^2}$.

1- Déterminer la FTBO et la FTBF du système ou procédé dans les cas suivants : K_R=0.5 ; 1 ; 2 ; 3 ; 5.
2- Donner l'allure des courbes des réponses indicielles de cet asservissement ;
3- Dans le plan de Bode et pour chaque valeur de K_R , tracer les diagrammes asymptotiques de la FTBO et donner l'allure des courbes.
4- Calculer la pulsation ω_1 pour laquelle $|FTBO(j\omega)|_{dB}=0$ et la pulsation ω_2 pour laquelle $Arg(FTBO(j\omega)=-135°$
5- Calculer la valeur de K_R pour avoir une marge de phase de 45°. Quel est alors l'écart de position (écart statique).

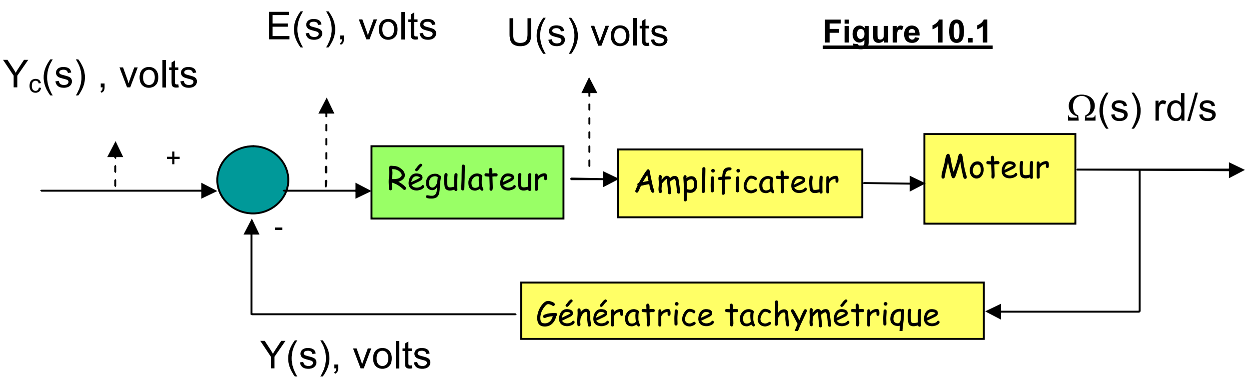
Exercice 13 : Régulation de vitesse d'un moteur à courant continu

Soit l'asservissement suivant de vitesse d'un moteur électrique à courant continu (Figure 10.1). Le moteur a pour fonction de transfert : $H(s) = \dfrac{10}{(1+0.001s)(1+0.02s)}$,

L'amplificateur de puissance à un gain en tension de A=10. La génératrice tachymétrique (capteur-transmetteur) est modélisée par une constante K_T = 0.1 V.s. On suppose que le régulateur de vitesse est à action proportionnelle : $H_R(s)=K_R$;

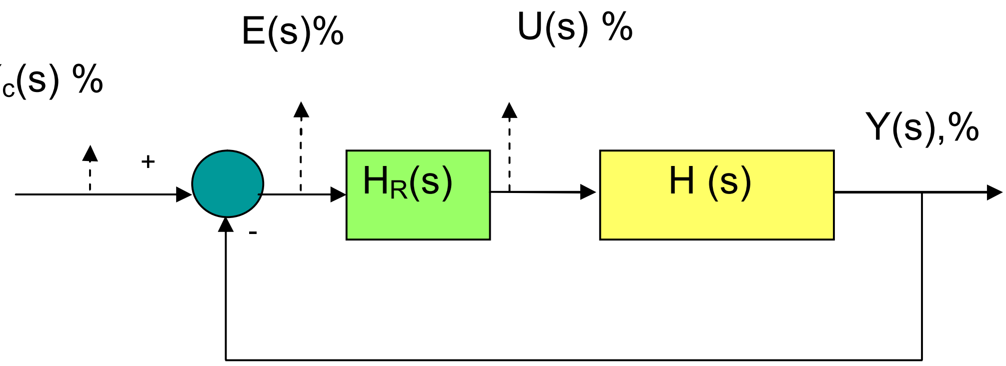
1- Tracer les diagrammes de Bode de la FTBO pour K_R=1.
2- Discuter de la stabilité en BF de ce système en fonction des valeurs de K_R .

3- Donner la valeur de K_R du gain qui assure au système en BF un facteur d'amortissement ζ= 0.7.
4- Calculer l'écart statique vis-à-vis d'une consigne de vitesse Y_{c0} constante. Comment annuler cet écart ?



Exercice 14:

On considère le système à retour unitaire dont le schéma fonctionnel est le suivant :

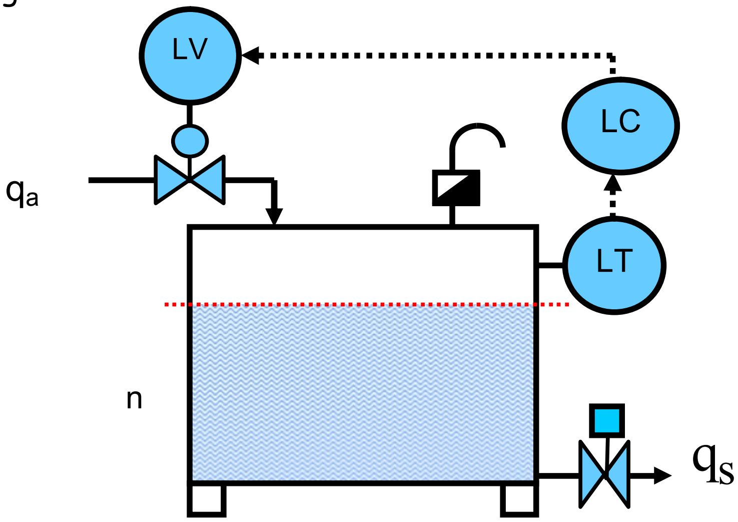


On donne : $H_R(s) = K_R$ et $H(s) = \dfrac{1}{s(1+0.1s)(1+0.05s)}$

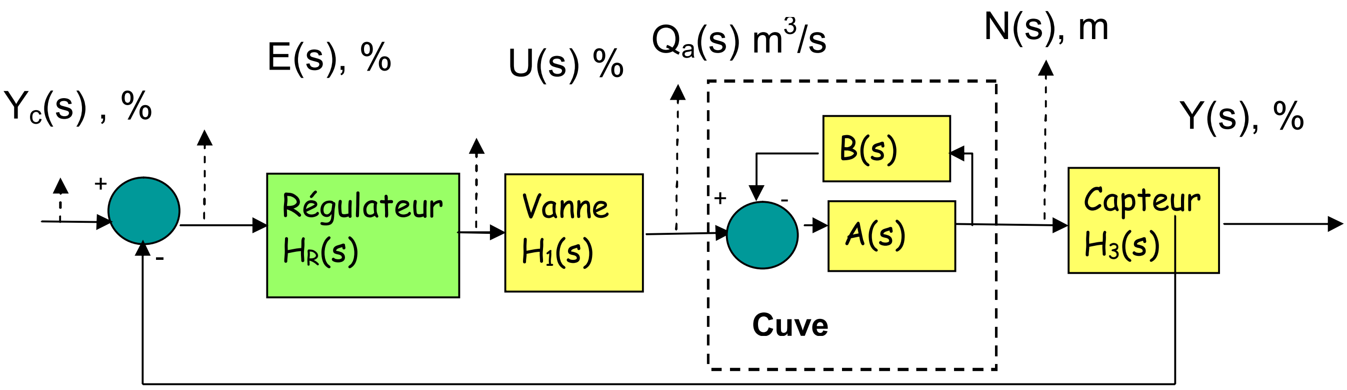
1- Tracer les diagrammes de Bode de la FTBO et discuter de la stabilité du système en BF.
2- Quelle valeur faut-il donner au gain K_R pour obtenir une marge de phase de 45° ?
3- Quelle valeur faut-il donner au gain K_R pour obtenir une marge de gain de 10 dB ?
4- Retrouver la condition de stabilité stricte avec le critère de Routh.
5- Tracer le diagramme de Black de la FTBO. Déterminer la valeur limite du gain K_R pour que la surtension reste inférieure à 30%.

Exercice 15: Régulation de niveau

On considère la régulation de niveau ci-dessus :



Le schéma fonctionnel correspondant est :



On donne :

- $H_R(s)=K_R$.
- La vanne automatique : $H_1(s) = \dfrac{K_1}{(1+T_1 s)}((m^3/h).\%)$.
- La cuve : $H_2(s) = \dfrac{N(s)}{Q_a(s)} = \dfrac{K_2}{(1+T_2 s)}(m./(m^3./h))$.
- Le capteur de niveau : $H_3(s) = \dfrac{K_3}{(1+T_3 s)}(\%./m)$

Application numérique :

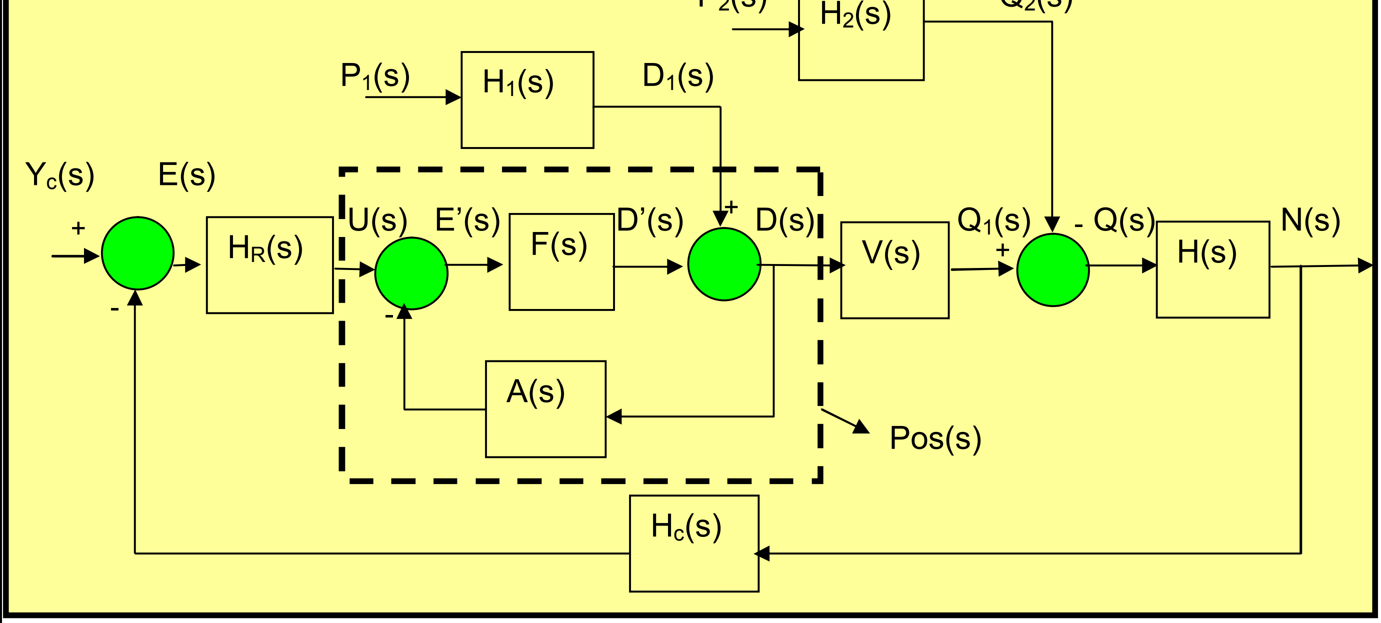
K_R=4 ; K_1=0.1 $m^3.h^{-1}$ /% ; K_2=2.5 $h.m^{-2}$; T_1=0.1 min ; T_2=2 min et T_3=0.02 min.

1- L'étendue de mesure (EM) du capteur est : 150 cm à 550cm. Calculer le gain statique K_3.
2- Exprimer l'écart statique ε_p pour une variation en échelon de la consigne $Y_c(s)=a/s$.
3- On adopte : y_c = y = 50% pour q_a = q_s (régime nominal). Exprimer ε_p en cm pour une variation de consigne Y_c=40 cm. Quelle est alors la nouvelle valeur du niveau n ?
4- Exprimer l'écart de traînage ε_v pour une variation en rampe de la consigne $Y_c(s)=a/s^2$

Exercice 16: Influence d'un positionneur de vanne, procédé de niveau

Soit un procédé H(s) contrôlé par un régulateur $H_R(s)$ et commandant une vanne automatique V(s) munie d'un positionneur Pos(s). Le niveau est mesuré par le capteur $H_c(s)$. Les principales perturbations sont $P_1(s)$ et $P_2(s)$. Figure 14.1.

Figure 14.1



Les fonctions de transfert sont :

$$H_R(s) = K_R \;;\quad F(s) = \frac{K_s}{(1+Ts)^2} \;;\quad V(s) = \frac{K_v}{(1+T_v s)} \;;\quad H_c(s) = \frac{1}{(1+T_c s)} \;;$$

$H(s) = \dfrac{Ke^{-\tau s}}{(1+Ts)}$; $A(s) = A$; $H_1(s) = \dfrac{K_1}{(1+T_1 s)}$; $H_2(s) = \dfrac{K_2}{(1+T_2 s)}$.

On donne ; K_R=4 ; K_s=5 ; K_v=1 ; K=1 ; A=0.05 ; K_1=1.5 et K_2=2.

1- Dans un premier temps, le positionneur n'est pas en fonctionnement, c'est-à-dire que la fonction de transfert Pos(s)=D(s)/U(s)=1.

Exprimer E(s) en fonction de Y_c(s), E(s) en fonction de P_1(s) puis E(s) en fonction de P_2(s).
Déterminer ε_p l'erreur statique pour Y_c(s)=a/s ; ε_p pour P_1(s)=b/s ; puis ε_p pour P_2(s)=c/s. Que constate-t-on ?

Exprimer E'(s) en fonction de P_1(s), puis déterminer ε'_p pour P_1(s)=b/s.

2- Le positionneur est maintenant en fonctionnement,
Exprimer E(s) en fonction de Y_c(s), E(s) en fonction de P_1(s) puis E(s) en fonction de P_2(s).
Déterminer ε_p l'erreur statique pour Y_c(s)=a/s ; ε_p pour P_1(s)=b/s ; puis ε_p pour P_2(s)=c/s. Que constate-t-on ?
Exprimer E'(s) en fonction de P_1(s), puis déterminer ε'_p pour P_1(s)=b/s. Que constate-t-on ?

Exercice 17: Modèle de référence de second ordre (réglage)

La fonction de transfert réglante (commande $\longrightarrow$ mesure G. réglée) d'un procédé a été déterminée par identification et elle est égale à $H(s) = \dfrac{Y(s)}{U(s)} = \dfrac{K}{(1+T_1 s)(1+T_2 s)}$. On cherche à obtenir pour la régulation de ce procédé une FT en boucle fermée de la forme : $FTBF(s) = \dfrac{Y(s)}{Y_c(s)} = \dfrac{1}{\dfrac{s^2}{\omega_o^2} + \dfrac{2\xi}{\omega o} s + 1}$.

1- Montrer qu'un régulateur PI de structure série peut satisfaire au fonctionnement désiré.
2- Prendre K=1.5 ; T_1=4min et T_2=10min pour l'application numérique. Calculer la valeurs des paramètres du régulateur H_R(s) pour obtenir un coefficient d'amortissement ζ = 0.5. Quelle est alors la pulsation propre non amortie ω_0 ? Quelle est la valeur du premier dépassement D_1 de la réponse indicielle ?

3- Après une période d'essais du procédé il s'avère finalement qu'il est préférable d'obtenir la fonction de transfert en chaine fermée FTBF(s) suivante :

$$FTBF(s) = \frac{Y(s)}{Y_c(s)} = \frac{1}{(1+T_d s)^2}$$ avec T_d=8min

Calculer les valeurs des nouveaux paramètres du régulateur $H_R(s)$ pour obtenir une telle fonction.

4- On décide d'ajouter une action dérivée et on fixe $T_d=T_1$ et $T_i=T2$.

Déterminer alors la FTBF(s). Pour un changement de 10% en échelon de consigne , calculer le temps de réponse à 5% pour une bande proportionnelle B_P=37.5%.

Exercice 18: Réglage dans le domaine fréquentiel

Un procédé a été modélisé par la méthode de Broïda. Il est régulé par un régulateur PID série de fonction de transfert : $H_R(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_R(1+\frac{1}{T_i s})(1+T_d s)$ (Figure 16.1).

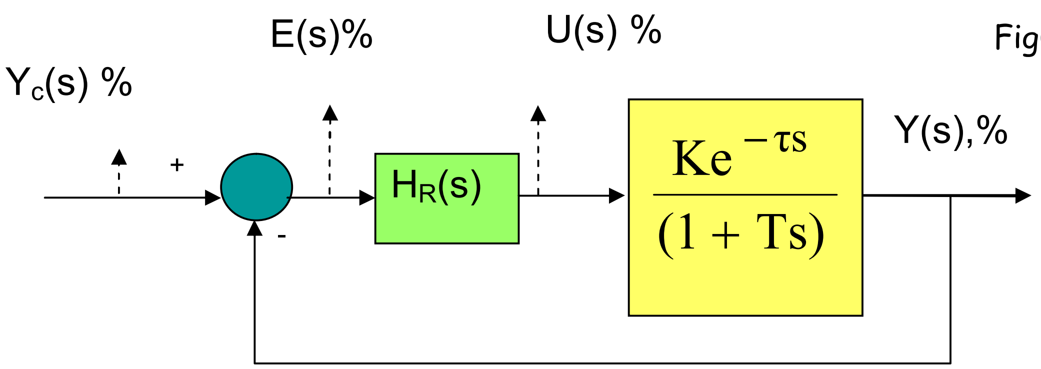


Figure 16.1

1- Etablir la fonction de transfert en chaine ouverte FTBO(s) du système asservi. Les valeurs trouvées lors de l'identification sont : T = 40s ; τ =8s et K=1.25 .

2- **Etude en action proportionnelle**

Exprimer le module et l'argument de la FTBO($j\omega$) pour K_R= 1/K.

Tracer la courbe de Nyquist de la FTBO($j\omega$) .Déterminer la marge de gain Mg et la marge de phase Mφ ou φ_m. Que peut-on en conclure ?

3- Etude en action proportionnelle et intégrale

Exprimer le module et l'argument de la FTBO(jω), si T_i=T.

Tracer la courbe de Nyquist de la FTBO(jω) pour K_R= 1/K. Déterminer la marge de gain Mg et la marge de phase Mφ ou φ_m. Déterminer la valeur de KR pour que la marge de gain soit Mg = 6dB.

4- Etude en action proportionnelle, intégrale et dérivée

Exprimer le module et l'argument de la FTBO(jω), si T_i=T.

On impose une marge de gain de Mg= 6dB et une action dérivée $T_d=1/\omega_c$.

Déterminer les valeurs de K_R et T_d.

Exercice 19 :

La fonction de transfert d'un moteur à courant continu (entrée commande régulateur, sortie position) est : $H(s) = \frac{50}{s(1+s)}$ (rd/v). Le capteur de position est supposé rapide de gain : $K_c = \frac{1}{50}(v/rd)$

Dans un premier temps le régulateur (correcteur) est proportionnel de gain K_R.

1- Ecrire la FTBF du système.
2- A l'aide du critère de Routh, étudier la stabilité du système en BF.
3- Etudier le régime permanent de la sortie y(t) si la consigne est un échelon unitaire.
4- Calculer l'erreur de vitesse ou de traînage. (la consigne étant une rampe unité).
5- Calculer les marges de phase et du gain du système pour K_R = 1.
6- Tracer le lieu de Black du système pour K_R = 1.
7- Pour annuler l'erreur de vitesse, on choisit un régulateur PI de fonction de transfert $K_R + \frac{1}{T_i s}$.Etudier la stabilité du système avec correcteur et vérifier que l'erreur de vitesse est annulée.
8- Proposer un réglage de K_R et de T_i pour avoir une marge absolue de stabilité supérieure ou égale à 0.2.

Exercice 20 :

Un jus est stocké dans un bac pour être ensuite concentrer dans un atelier d'évaporation. Afin de suivre convenablement la production, le niveau dans le bac doit être régulé comme indiqué sur la figure 18.1.

Le modèle de la vanne automatique est donné par l'équation différentielle suivante :

$$T_v . \frac{dq_0(t)}{dt} + q_0(t) = K_v u(t)$$

Où u(t) : est le signal de commande (%)

T_v : constante de temps de la vanne

Le capteur est supposé très rapide et donc son modèle est y(t) =K_c.z(t)

K_c : l'échelle de conversion (%/m); y(t) est la mesure (%) et z(t) la mesure en m.

1-On cherche à obtenir le schéma bloc du système en BF de la figure 18.2.

Déterminer les fonctions de transfert H(s) et L(s). H_R(s) est la fonction de transfert du régulateur.

2- Si la vanne est NF, quel doit être le sens de la régulation ?

3- Le régulateur est proportionnel (P).

3-1 Evaluer l'erreur de position suite aux échelons simultanés de la consigne et de la perturbation respectivement de Δy_c et Δq_e.

3-2 Discuter la stabilité du système en BF.

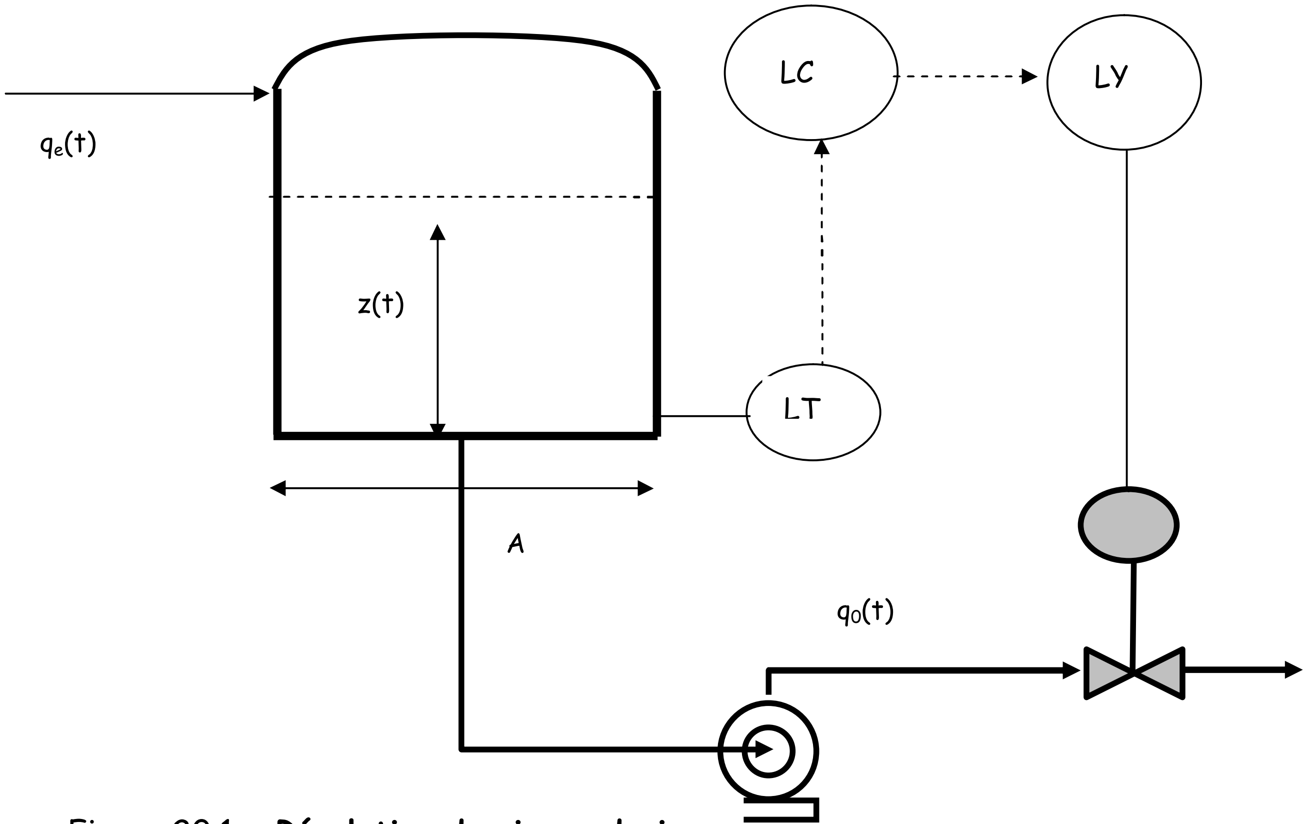


Figure 20.1 : **Régulation de niveau de jus**

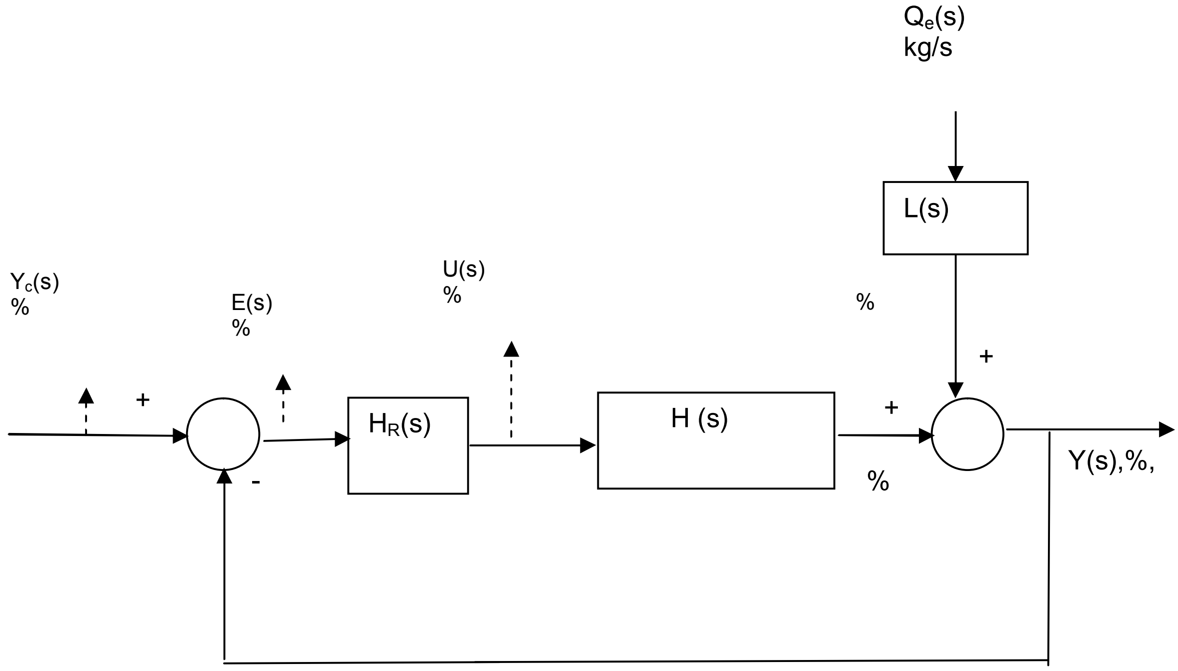


Figure 20.2 : Schéma bloc du système en BF

Application numérique :

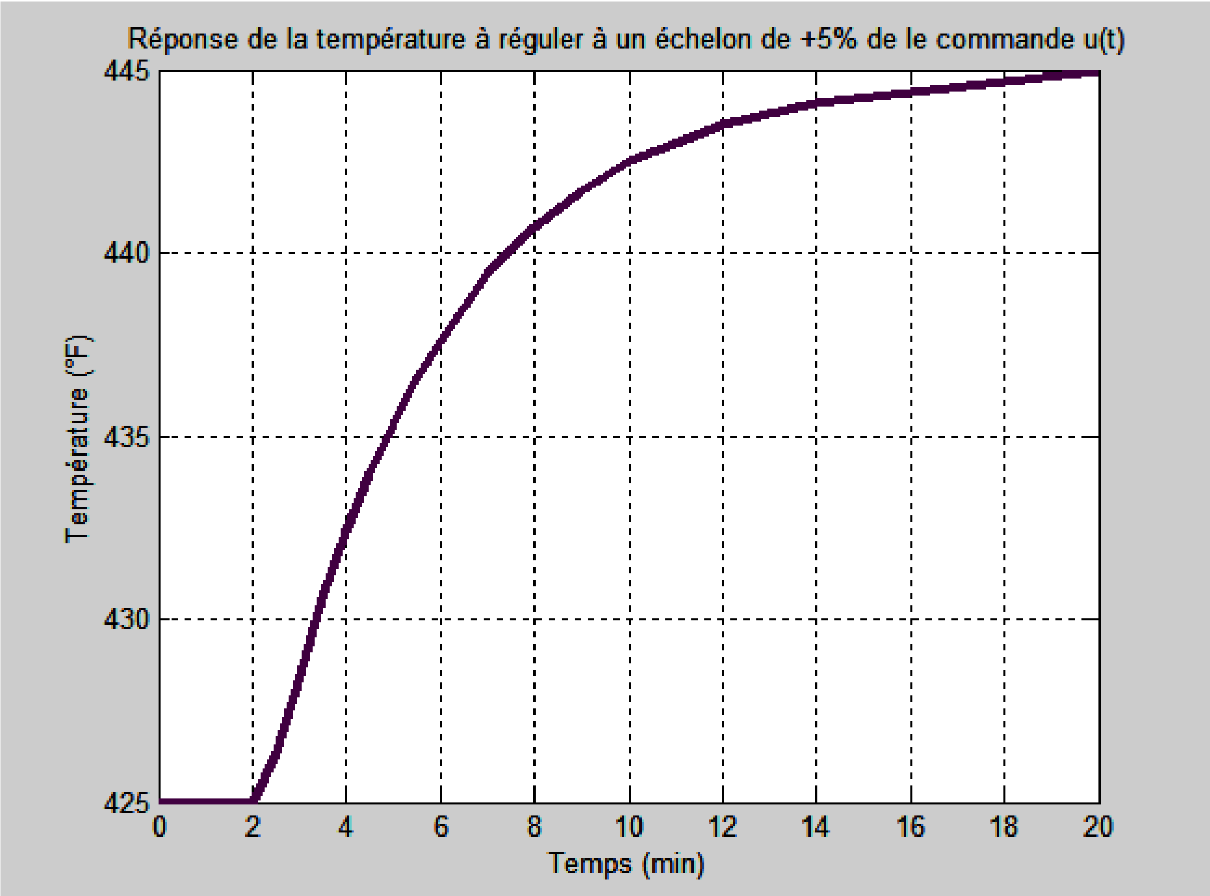
$$K_v = 6.31.10^{-4}\,\frac{m^3/s}{\%} \quad ; \quad K_c = 41\frac{\%}{m} \quad ; \; A = 4.67m^2 \quad ; \; T_v = 3s$$

On fixe ζ=0.7, calculer le gain du régulateur K_R , le temps de réponse à 5% , la marge de phase et le dépassement .

3-3 Calculer l'erreur de position pour Δq_e = 6.31 lites/s. Afin d'annuler cette erreur on ajoute une action intégrale T_i, et le régulateur est alors PI. Comment doit-on choisir T_i pour obtenir un système stable en BF. Proposer un réglage de T_i et K_R pour obtenir un système stable en BF avec une marge de phase égale 45°. Faire l'application numérique pour $T_i = 6T_v$ et tracer le diagramme de Bode de la FTBO .

Exercice 21 :

Le four représenté en figure 19.1 est utilisé pour chauffer l'air nécessaire à la régénération d'un catalyseur. Le capteur-transmetteur de température est calibré pour l'étendue 300-500 °F. La réponse de la température (de l'air chauffé) à un échelon de commande de U(t)=Δu =+5% est donnée su la figure suivante :



1- Quel doit-être le type de la vanne (Actionneur) : NF ou NO ? Justifier votre réponse.
2- Quel est alors le sens de la régulation ?
3- Identifier le système par la méthode de BROIDA. Le régulateur est un PID analogique mixte, 4-20mA sur les canaux de mesure et de correction. Quelle est la structure de la loi de commande à programmer ? Quelles sont les valeurs des paramètres à programmer sur le régulateur.

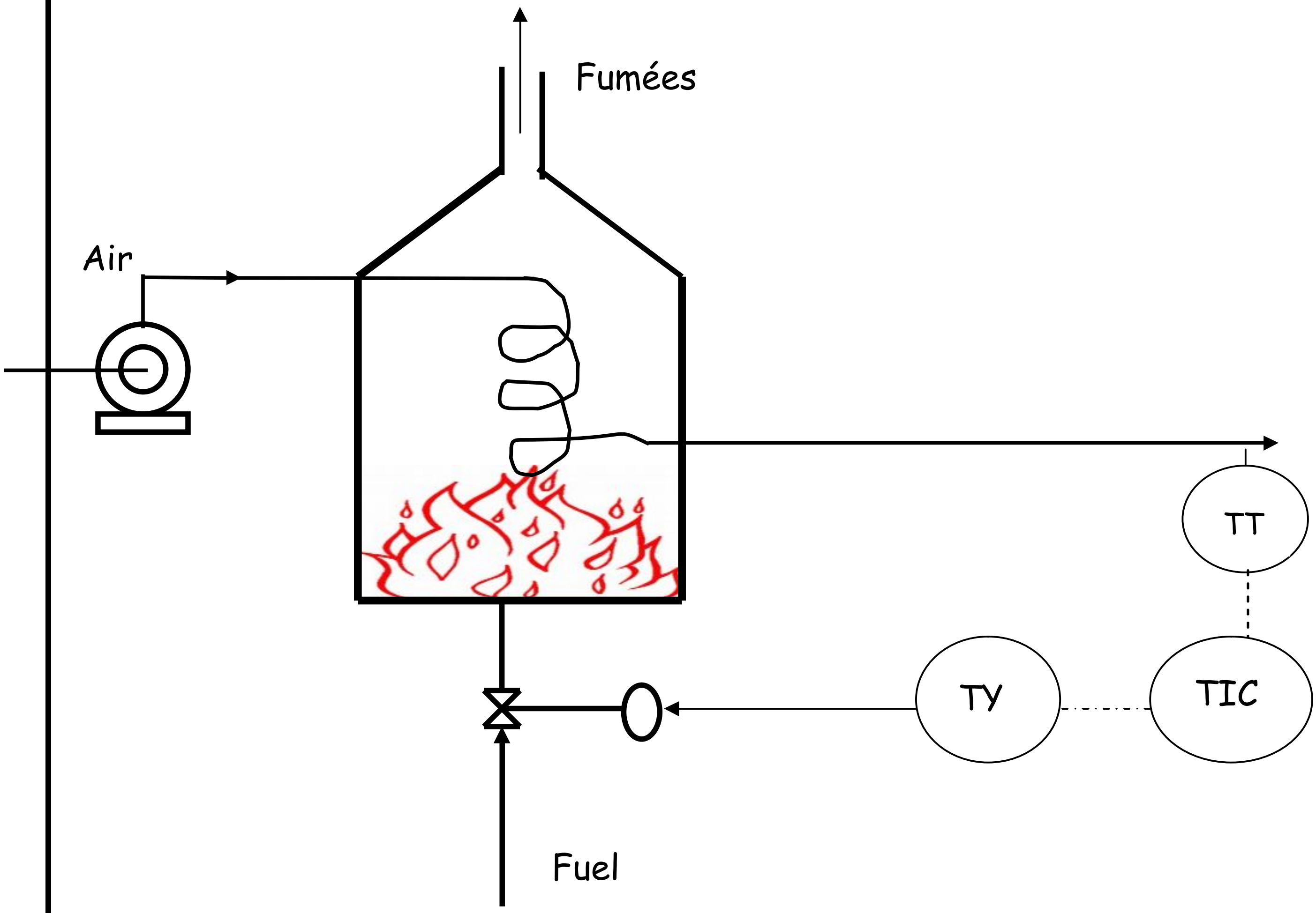


Figure 21.1 : Four de chauffage de l'air

Exercice 22 : Régulation ou correction par avance de phase

Soit le système en BF représenté ci-dessous :

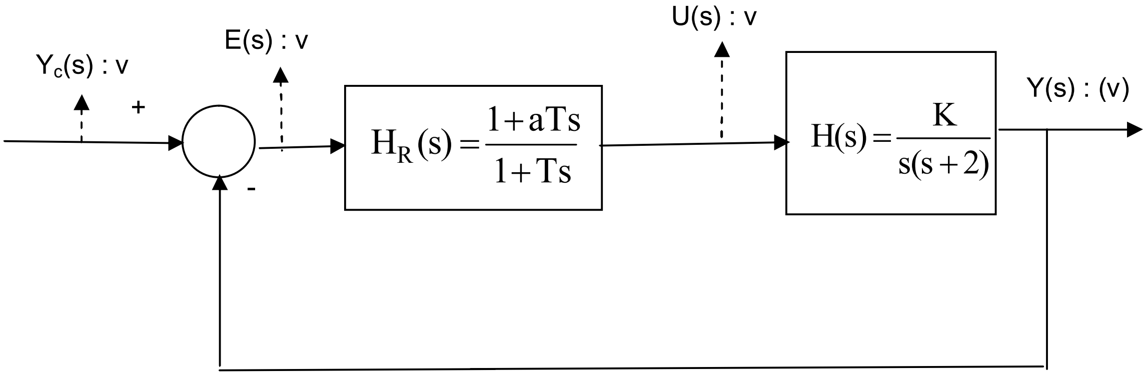


Figure22.1 : Schéma bloc du système en BF , régulation par avance phase

$H_R(s)=\frac{1+aTs}{1+Ts}$ est la fonction de transfert d'un régulateur ou correcteur par avance de phase avec a > 1. Nous fixons les performances du système compensé par le cahier des charges suivant :

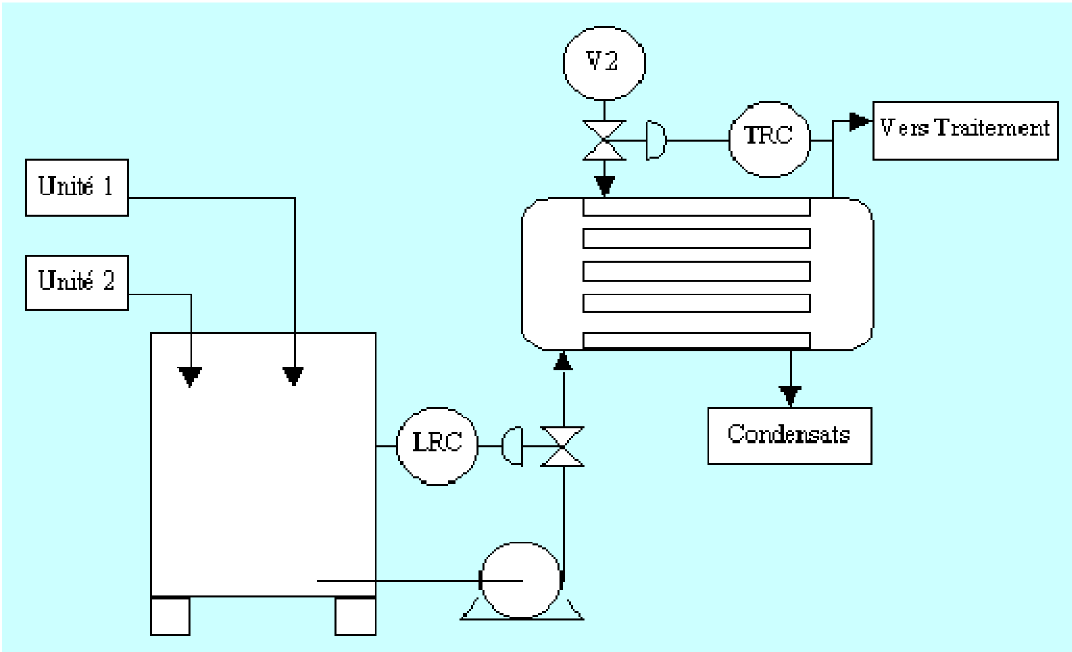
- erreur de trainage inférieur ou égale à 0.1 ;
- marge de phase supérieure à 45° ;
- comportement du système du type second ordre avec un coefficient d'amortissement $\zeta=\sqrt{2}/2=0.7$.

1- Calculer les paramètres a,T et K satisfaisant le cahier des charges.
2- Déterminer les performances du système ainsi compensé (dépassement, temps de monté, temps de réponse à 5%, l'erreur de trainage, la marge de phase).

PROBLEMES

Problème 1 :

Soit le procédé suivant :



Le fluide procédé est le résidu de fonctionnement des unités 1 et 2. Le débit nominal est de 500 L/h pour l'unité 1 et de 700 L/h pour l'unité 2 avec des maxima à 1000 L/h pour l'unité 1 et 1400 L/h pour l'unité 2. Le fluide procédé arrive dans une cuve de stockage de 5 mètres de haut, le niveau nominal de cette cuve est de 4 mètres. La cuve étant situé dans un hall, la température nominale du liquide stocké est de 20 °C. Le fluide procédé est repris par une pompe centrifuge et envoyé vers un échangeur de chaleur. Le fluide procédé traverse l'échangeur dans les tubes, tandis que le fluide thermique, de la vapeur d'eau saturante à 2 bar, se condense dans la calandre de l'échangeur de chaleur. Le fluide procédé est ainsi chauffé à une valeur nominale de 75 °C. Il demeure à l'état liquide.

Il ne doit pas être vaporisé. Sa température d'ébullition est de 135 °C, il est potentiellement explosif. Le débit nominal de vapeur d'eau nécessaire pour chauffer le débit nominal de fluide procédé jusqu'à la température de 75 °C est de 750 kg/h, au maximum de 2000 kg/h. Le fluide procédé est ensuite envoyé vers une unité de traitement.

1-Pour chacune des 2 régulations, préciser quelles sont les grandeurs réglées, réglante et perturbantes. Donner la valeur de Consigne de chacune d'elles.

2-Choix des capteurs : le LT est un capteur passif, d'étendue d'échelle 0 à 6 mètres, de signal 4-20 mA, muni d'une sécurité intrinsèque ; le capteur TT est un capteur actif, d'étendue d'échelle 10 à 150 °C, de signal 4-20 mA, muni d'une sécurité ADF.

- Expliquez pourquoi ces capteurs conviennent.

3-Choix des vannes de régulation : la vanne LV est pneumatique, NO, munie d'un positionneur, de débit maximum 3000 L/h, le débit varie linéairement avec la commande ; la vanne TV est pneumatique, NF, munie d'un positionneur, de débit maximum 2000 kg/h, le débit varie linéairement avec la commande.

- Quel est le rôle du positionneur ?
- A-t-on eu raison de choisir une vanne NF pour la TV ?
- Le débit maximum de 3000 L/h de la LV convient-il ?

4-On dispose de 2 régulateurs 4-20 mA sur les canaux de mesure et de correction, les régulateurs sont capables d'alimenter les boucles de mesure, ils sont situés en salle de contrôle, le LC est mixte et le TC est parallèle. On dispose de 2 enregistreurs 2 voies, situés en salle de contrôle, le LR fonctionne en entrée 4-20 mA et le TR fonctionne en entrée 1-5 V, ils sont destinés à enregistrer les variations de la mesure et de la correction sur chaque boucle de régulation. On dispose ensuite de tous les convertisseurs et de tous les types d'alimentations nécessaires.

Effectuer les câblages de chacune des deux boucles de régulation.

5-Application numérique :

5.1- Le LT mesure 1.5 m dans la cuve, quelle est l'intensité transmise au régulateur LC ?

5.2- Le TC reçoit du TT une intensité de 16.3 mA, quelle est la valeur de la température mesurée par le capteur-transmetteur de température ?

5.3- Le LC envoie à la LV une commande u de 65 %, quelle est la pression de commande, l'ouverture de la vanne et le débit qui traverse la LV ?

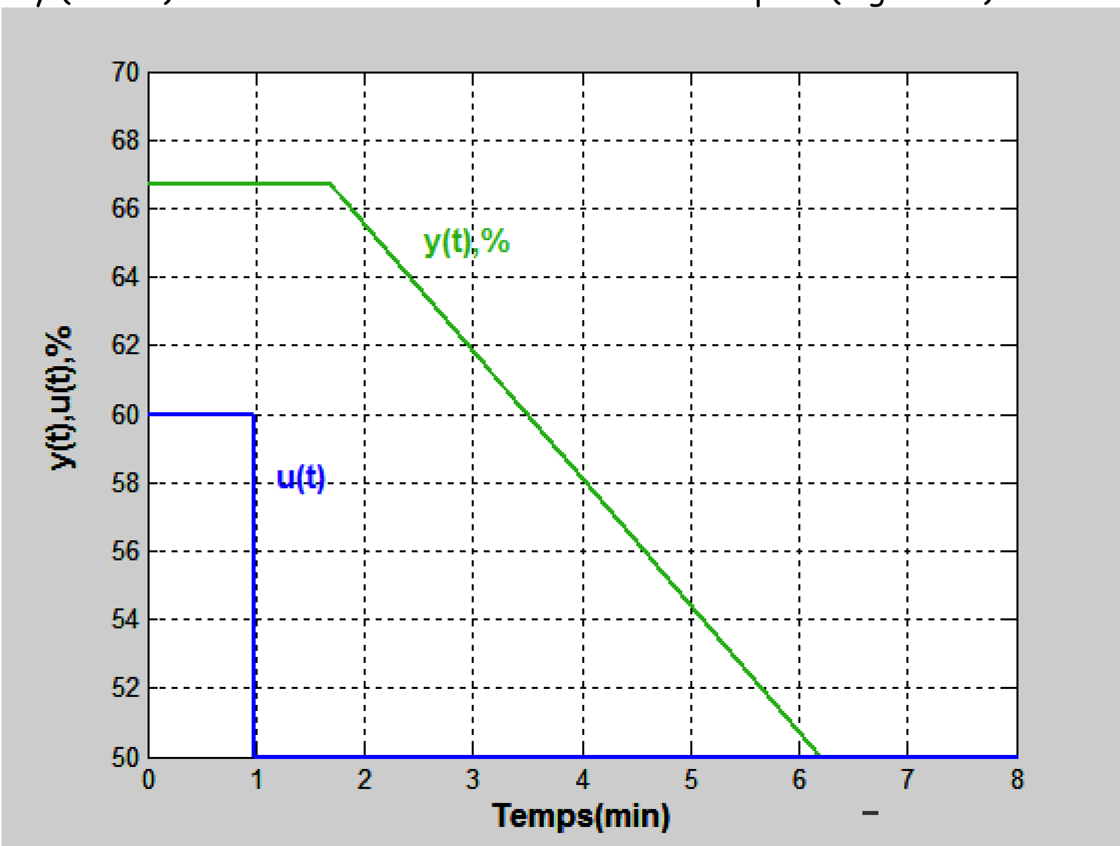
5.4- La TV laisse passer un débit de 1200 kg/h, quelle est l'ouverture de la vanne, la valeur de la pression de commande et la valeur de la commande envoyée par le régulateur TC ?

6-Pour la régulation de température seulement, déterminer la consigne à programmer sur le régulateur, le sens d'action et la valeur centrale u_0.

7-La consigne à programmer sur le LC est de 66.7 %, le sens d'action est négatif (inverse), la valeur centrale est de 60.0 %. Le régulateur est en automatique en mode Proportionnel seul avec un gain de 1. La régulation stabilise le niveau à 4.5 mètres. Le débit de fluide procédé issu de l'unité 2 est à sa valeur nominale, par contre, le débit issu de l'unité 1 est à une valeur différente de sa valeur nominale.

Déterminer la valeur du débit de l'unité 1 ?

8-Pour la régulation de niveau uniquement. L'analyse de la dynamique grandeur réglante - grandeur réglée est effectuée pour identifier le système. Les évolutions dans le temps de la mesure y (niveau) et de la commande u sont données ci-après (Figure 1.1) :



Déterminer la fonction de transfert réglante. En déduire le mode idéal de régulation et les paramètres du régulateur.

Problème 2 : Régulation de niveau d'un réservoir

Soit une installation de dilution d'un sirop (figure 2.1). On maintient le niveau constant dans le réservoir afin s'assure un débit de sortie constant q_s pour une ouverture fixé de la vanne manuelle HV. Le débit q_a n'est pas contrôlable puisqu'il provient d'un autre atelier.

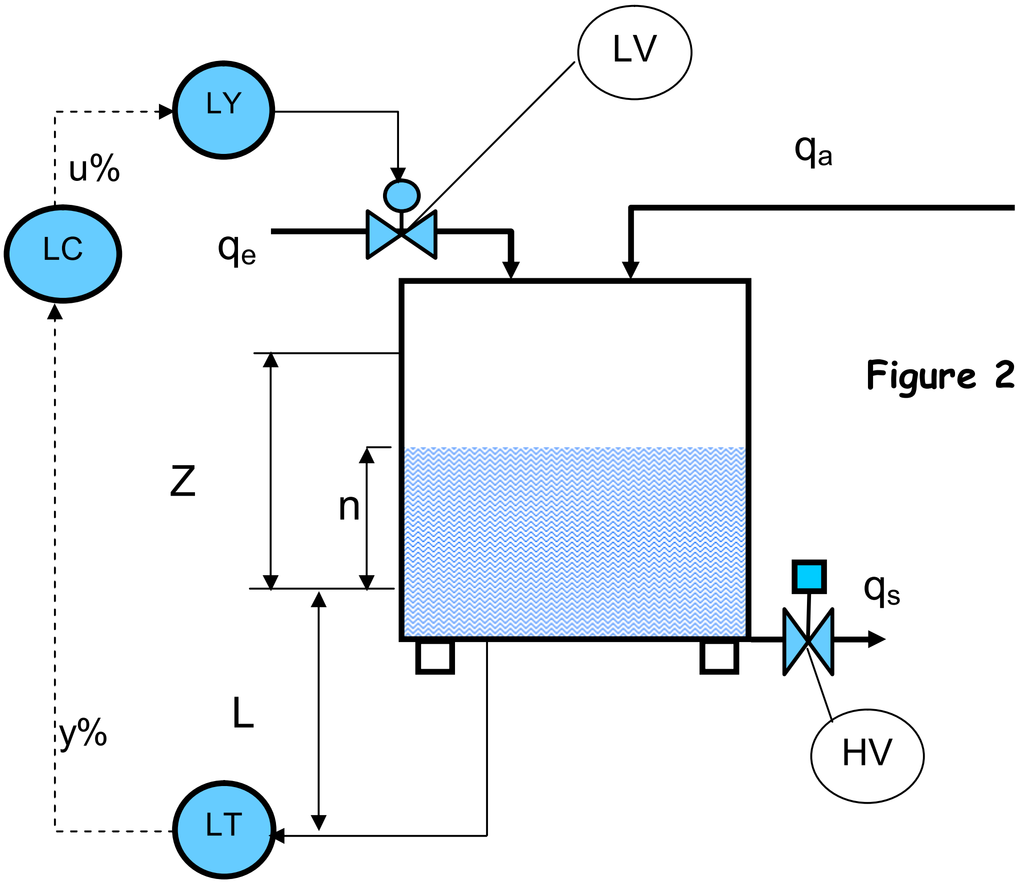


Figure 2.1.

1-Etendue d'échelle du transmetteur

Le transmetteur de niveau est un transmetteur électronique de pression relative à sortie en courant (4-20mA). On donne : densité du liquide d =1 ; hauteur Z = 2m ; hauteur entre la prise de pression de LT et le niveau d'échelle minimal désiré L=1.5m.

Déterminer l'échelle et le décalage de zéro du transmetteur de niveau.

Quelles sont les grandeurs réglées, réglante et perturbantes ?

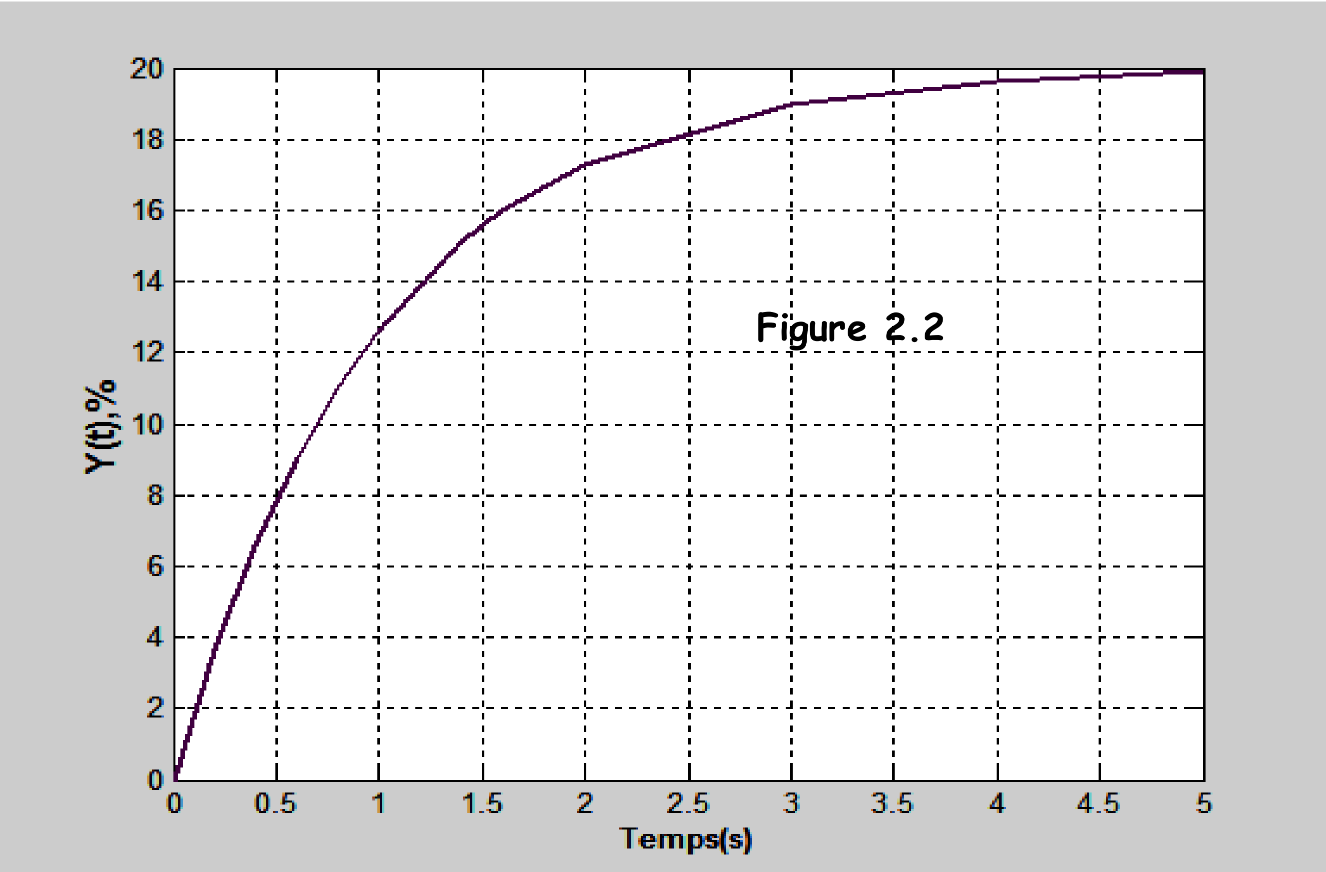
2-Fonction de transfert du transmetteur

Une variation de la pression relative de 20% à l'entrée du transmetteur donne la réponse de y en % que l'on reporte sur la figure 2.2
Exprimer la fonction de transfert du transmetteur $H_T(s)=Y(s)/N(s)$.

3-Fonction de transfert du procédé non instrumenté

L'équation différentielle linéaire du niveau s'écrit :

$T\frac{dN(t)}{dt}+N(t)=Q_a+Q_e$, N, Q_a et Q_e sont respectivement les variations réceptives de n, q_a et q_e. Exprimer la fonction de transfert $H_n(s)=N(s)/Q_e(s)$ avec T = 25 s.



4-Fonction de transfert de l'ensemble convertisseur-vanne

Une variation U en échelon de 50% du signal de commande u (entrée convertisseur) a permis d'enregistrer l'évolution du débit Q_e en fonction du temps (Figure 2.3).

Exprimer la fonction de transfert de l'ensemble convertisseur/vanne $H_v(s)=Q_e(s)/U(s)$.

5-Etude de la régulation

5.a) Exprimer la fonction de transfert réglante $H(s)=Y(s)/U(s)$.

5.b) Etablir le schéma fonctionnel de ce procédé en incluant les perturbations.

6- Ce procédé est contrôlé par le régulateur LIC de fonction de transfert $H_R(s)=K_R$. Lors d'un changement de consigne Y_c =20%, on souhaite obtenir un écart statique inférieur à 2%.

6.a) Quelle doit être alors la valeur minimale de K_R ?

6.b) Avec la valeur de K_R trouvée précédemment, le système est-il stable ?

6.c) Quelle est alors la réponse indicielle obtenue avec un gain K_R = 10 (en négligeant la plus petite constante de temps du procédé ?

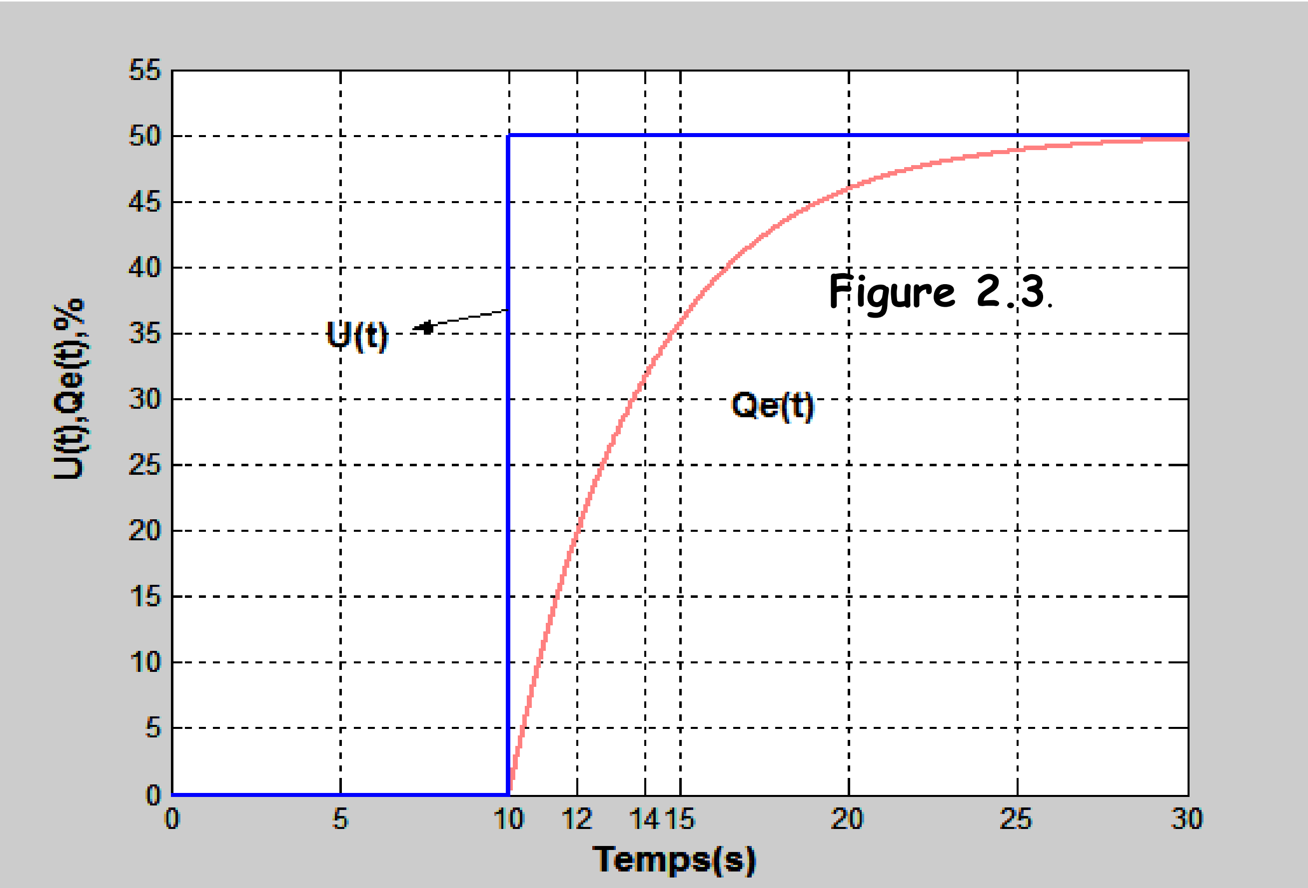


Figure 2.3.

7- Le système ainsi réglé est assez précis mais, en revanche, un trop grand dépassement est observé lors du changement de consigne Y_c. On décide alors de prendre le régulateur LIC tel que : $H_R(s)= K_R\,(1+1/T_is)$.

Calculer l'écart statique pour des changements en échelon de consigne $Y_c(t)=a$ et de perturbation $Q_a(t)=b$.

8-Le niveau est stable à n=1m avec un débit q_a égal à 50% du débit maximal ; on adopte une constante de temps d'intégral T_i = 25s et un gain K_R de 4.
En négligeant la constante de temps la plus petite du procédé, exprimer la réponse Y(t) lors d'une variation brusque de consigne Y_c (t)=20%, puis tracer cette réponse.

9- Exprimer la réponse Y(t) lors d'une variation brusque de débit Q_a(t)=20%, puis tracer cette réponse.

Problème 3 : Régulation de température

On désire réguler la température T d'une enceinte à chauffage indirecte (Figure 3.1).
u(t) : signal de commande de la vanne automatique (courant mA).
q(t) : débit du fluide utilitaire (chaud).
T_1 : température en sortie de l'échangeur (fluide chauffant l'enceinte).

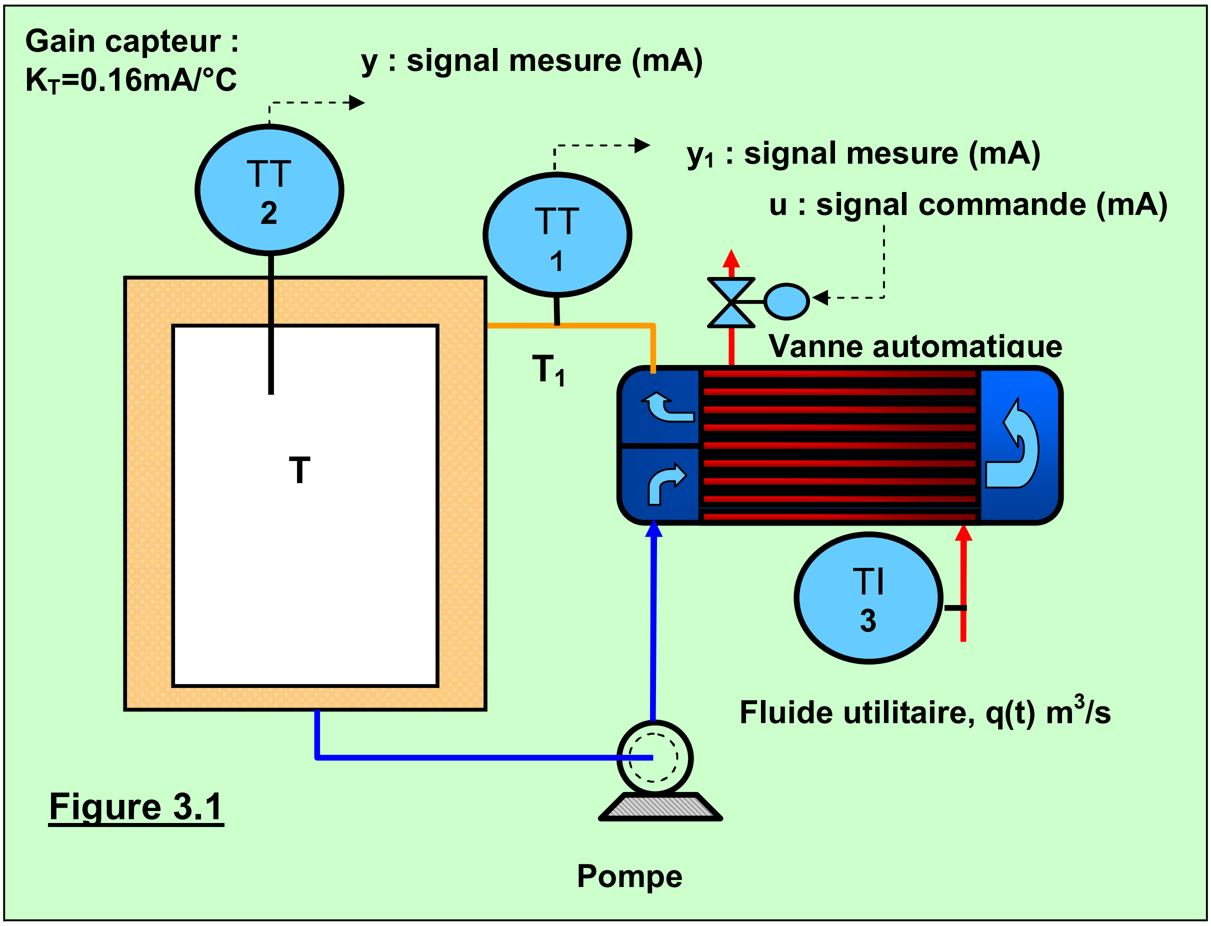


Figure 3.1

On donne les relations suivantes (Modèles dynamiques linéaires) :

Modèle dynamique linéaire signal commande-grandeur réglante : $\frac{dq(t)}{dt} = k_0 u(t)$

Modèle dynamique linéaire échangeur de chaleur : $T_1(t) + \tau_1 \frac{T_1(t)}{dt} = k_1 q(t)$

Modèle dynamique linéaire enceinte : $T(t) + \tau_2 \frac{T(t)}{dt} = k_2 T_1(t)$

On suppose que toutes les conditions initiales sont nulles. Pour les applications numériques, on prendra : τ_1 =600s, τ_2 =6000s, k_2 =1 , k_1=20 S.I, k_0=2.10^{-4} S.I. On posera λ=k_1.k_2.k_0.

Dans l'énoncé, il est précisé explicitement s'il faut faire les applications numériques. Sinon l'étudiant donnera les résultats littéraux.

Les trois régulations peuvent être traitées indépendamment.

1-Retrouver les fonctions de transfert $H(s) = \dfrac{\Gamma(s)}{U(s)}$ et $H_1(s) = \dfrac{\Gamma(s)}{\Gamma_1(s)}$, liant T(t) à u(t) et T(t) à $T_1(t)$ puis donner un schéma fonctionnel (entrée U(s) et sortie $\Gamma(s)$). On rappel que U(t), $\Gamma(t)$ et $\Gamma_1(t)$ sont les déviations ou variations respectivement de u(t) T(t) et $T_1(t)$ autour du régime nominale.

2-<u>Etude d'une régulation proportionnelle</u> : $u(t)= K_R\,(y_c(t)-y(t))$

$y_c(t)$ est la température de consigne (en mA), y(t) est la mesure (en mA) de la température de l'enceinte (grandeur réglée).

2-1 Représenter le schéma fonctionnel du procédé en boucle fermée.

2-2 Soit FTBO(s), la fonction de transfert en boucle ouverte du système. Représenter les pôles de la FTBO(s). Pour déterminer K_R, on va négliger un des pôles du système.

2-3 Quel est le pôle à négliger ? Donner l'expression de la fonction de transfert en boucle ouverte approchée FTBOA(s).

2-4 Calculer la fonction de transfert en boucle fermée approchée FTBFA(s). Vérifier que FTBFA(s) est un second ordre.

2-5 Calculer la valeur de K_R, pour avoir un amortissement réduit de 0.7. Faire l'application numérique.

2-6 Déterminer le temps de réponse à 5% du procédé ou système asservit. Faire l'application numérique.

2-7 Calculer la valeur finale de la sortie et le dépassement en réponse à un échelon de consigne $\Delta T_c = 10°$ et représenter l'allure de la courbe de la sortie.
2-8 Déterminer la marge de phase et de gain du système. (Faire l'application numérique).

2-9 Tracer les diagrammes asymptotiques de Bode (Amplitude et phase), représenter sur les diagrammes les marges de gain et de phase.

2-10 Conclure sur la robustesse du système dans l'hypothèse où K_R peut varier de 50%.

3-Etude d'une régulation proportionnelle et dérivée : $U(s)= (1 +T_d\, s)(Y_c(s)-Y(s))$.

On choisit $T_d=\tau_2$.

3-1 Donner le schéma fonctionnel et la fonction de transfert du système en boucle fermée.

3-2 Calculer la valeur de KR, pour avoir un amortissement réduit de 0.7.

3-3 Calculer le temps de réponse à 5% du système asservit. Faire l'application numérique.

3-4 Calculer la valeur finale de la sortie et le dépassement en réponse à un échelon de consigne $\Delta T_c = 10°$ et représenter l'allure de la courbe de la sortie.

3-5 Conclure sur l'avantage par rapport au régulateur proportionnel.

4-Etude d'une régulation en cascade.

On asservit d'abord la température avec un régulateur PD : $U(s)= (1 +T_d\, s)(Y_{c1}(s)-Y_1(s))$.

4-1 Représenter le schéma fonctionnel de cette partie du système.

4-2 Choisir T_d de façon que $\dfrac{Y_1(s)}{Y_{1c}(s)}$ soit un système du premier ordre.

4-3 Choisir K_R pour avoir un temps de réponse de $y_1(t)$ égale à τ_1 lorsque $y_{1c}(t)$ est un échelon.

On réalise une deuxième boucle avec un régulateur PI.

$$Y_{1c}(s) = K_i.\frac{1+T_i s}{s}(Y_c(s) - Y(s))$$

4-4 Représenter le schéma bloc de l'ensemble du procédé en Boucle fermée (deux boucles : boucle interne sur T_1 et boucle externe sur T).

On choisit $T_i = \tau_2$

4-5 Réduire ce schéma fonctionnel.

4-6 Montrer que le système est un second ordre.

4-7 Calculer la valeur de K_i, pour avoir un amortissement réduit de 0.7.

4-8 Déterminer le temps de réponse à 5% du système asservit. Faire l'application numérique.

4-9 Calculer la valeur finale de la sortie et le dépassement en réponse à un échelon de consigne $\Delta T_c = 10°$ et représenter l'allure de la courbe de la sortie.

4-10 Conclure sur l'avantage de cette régulation en cascade.

Problème 4 : Régulation d'un procédé de premier ordre

On considère un système de premier ordre : $H(s) = \frac{K}{(1+Ts)}$. On désire améliorer la précision et la rapidité de ce système, en régulation (consigne fixe), par l'intermédiaire d'un régulateur. On propose le schéma fonctionnel suivant :

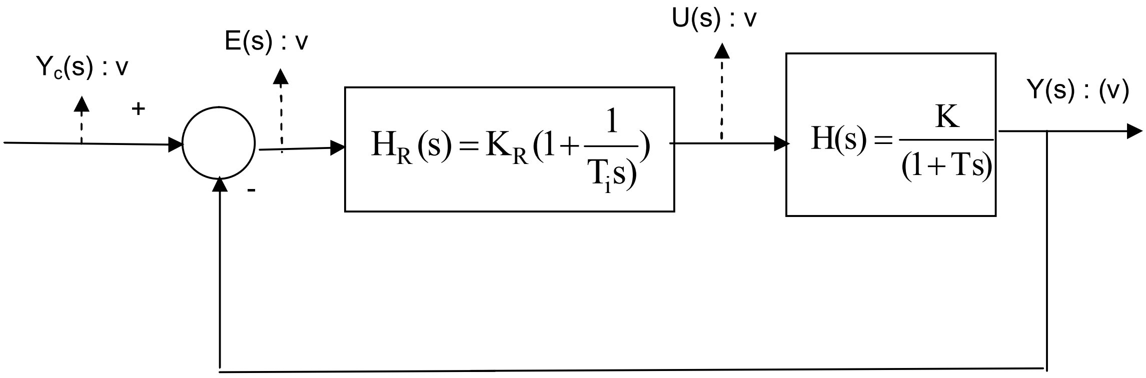


Figure4.1 : Schéma bloc du système en BF

Première partie

2- Justifier le choix de ce régulateur.
3- Comment doit-on choisir T_i pour que la FTBF soit de 1erordre ?
4- Quelle est la constante de temps du système en BF ? Comment peut-on la réduire ?
5- Calculer, en fonction de la consigne R(s), le signal de commande U(s) appliqué à l'actionneur.
6- La consigne est un échelon d'amplitude a.
   5-1 Quelle sera la valeur permanente du signal de commande $u(t=\infty) = u(\infty)$?
   5-2 Quelle sera sa valeur initiale $u(t=0) = u(0)$?

5-3 Quelle valeur maximale du gain K_R maintient la valeur u(0) inférieure à cinq fois la valeur u (∞)?

7- Soit $t_{5\%}$ le temps de réponse du système sans correction. Quelle est la valeur minimale du temps de réponse qu'on peut avoir avec correction tout en respectant la condition (5.3).

Deuxième partie

1- En supposant négligeable l'influence du dénominateur de la FTBF, déterminer les valeurs de ζ , ω_0 (en fonction de K, K_R, T et de T_i) du système en boucle fermée.
2- Le temps de réponse à 2% du système (sans correction) est $t_{2\%BO}$ = 4.T. Celui du système du 2[ème] ordre est $t_{2\%BF} = 4/(\zeta.\ \omega_0)$. Donner l'expression de K_R et T_i pour avoir ζ =0.7 et $t_{2\%BF} = t_{2\%BO}/3$.

On propose de modifier la structure de régulation selon la figure suivante :

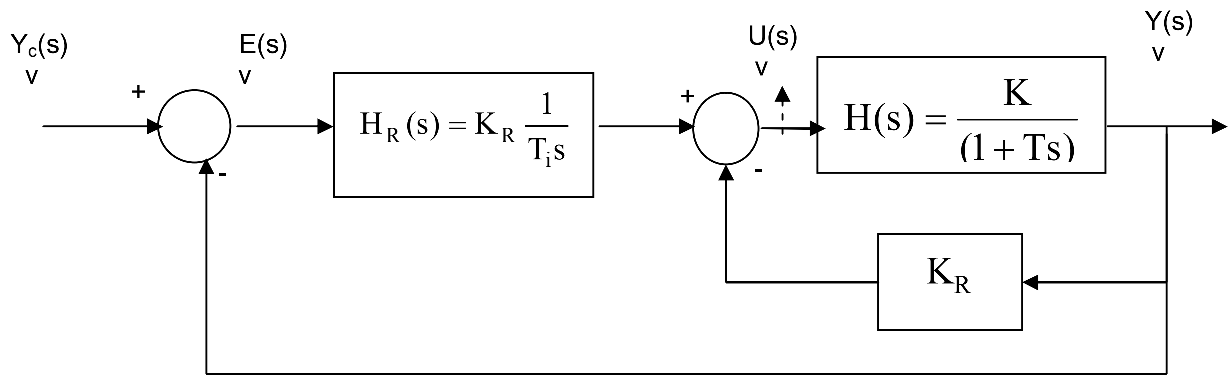
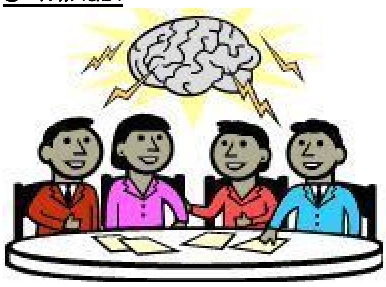


Figure4.2 : Schéma bloc modifié du système en BF

3- Calculer la FTBF et comparer à la question 1.
4- Calculer le signal de commande en fonction de E(s) et Y(s). Comparer avec la première structure de régulation et conclure.



je réfléchis avant de consulter la correction!