

**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
Scientifique**



Université Echahid Hamma Lakhdar – El Oued

Faculté de la Technologie

.Département de Génie Electrique



Cours de:

Régulation Industrielle

Niveau : 3^{ième} Année Licence Electrotechnique

Préparé par :

BABA ARBI Idriss

Maître Assistant A

Année universitaire: 2019/2020

Chapitre II: Régulateur Tout Ou Rien (TOR)

Le concept Tout Ou Rien (TOR) ramène au binaire (0 ou 1) c-à-d le traitement de l'information à deux états (Marche-Arrêt) , (On-Off)

1. Principe de fonctionnement du régulateur TOR:

Un régulateur Tout Ou Rien génère une commande discontinue pouvant prendre deux valeurs seulement (0 ou 1) , (On/Off), (0% ou 100%) , (-Umax/+Umax)...etc.

Si on considère un système possédant une entrée E , et une sortie S telles que :

E ne prend que deux valeurs possibles : 0 ou bien 1

E = 1 ⇒ S augmente

E = 0 ⇒ S diminue

Exemple: Chauffage d'une chambre.

E = 1 → le radiateur chauffe → la température S augmente.

E = 0 → le radiateur est à l'arrêt → la température S diminue .

Cahier des charges :

On désire que la grandeur **S** reste comprise entre deux valeurs **S_{min}** et **S_{max}**.

Solution : constituons un régulateur TOR fonctionnant selon l'algorithme suivant :

```
SI (S <= Smin)
```

```
    E = 1;
```

```
SINON
```

```
    SI (S >= Smax)
```

```
        E = 0;
```

```
    FIN_SI
```

```
FIN_SI_SINON
```

On constate que pour $S_{\min} < S < S_{\max}$, la valeur de E est inchangée (E garde sa valeur précédente qui était soit 1, soit 0). S varie ainsi dans la plage $[S_{\min}, S_{\max}]$.

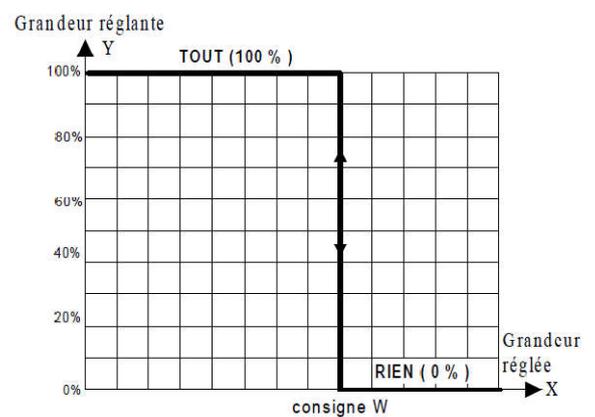
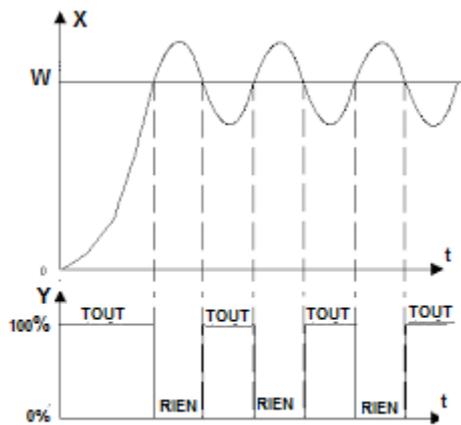
2. Tout Ou Rien avec hystérésis:

Pour un système de régulation TOR avec une grandeur réglée X, une variable réglante Y et un consigne W.

$$\begin{cases} \text{Si } X < W \text{ alors } Y = 100\% \\ \text{Si } X > W \text{ alors } Y = 0\% \end{cases}$$

La réponse du système oscille donc autour du point de consigne.

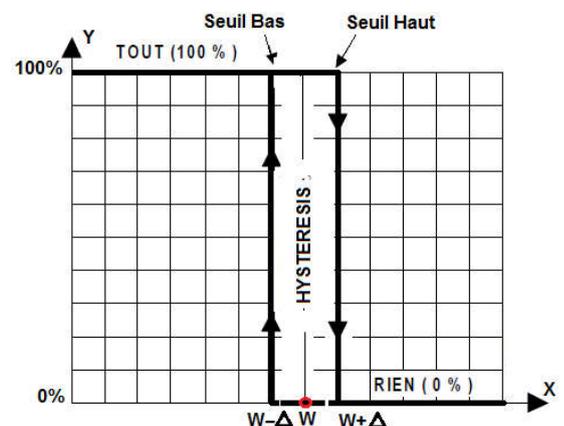
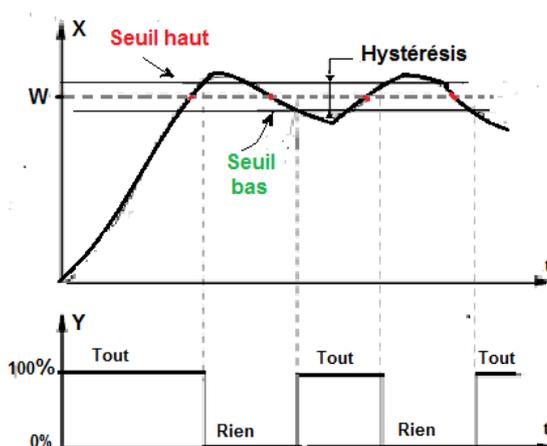
Un seul seuil ici est appliqué c'est la consigne elle-même.



Afin de diminuer le phénomène d'oscillation à haute fréquence autour de la consigne, on introduit un deuxième seuil.

- Le premier seuil met en marche la commande **Rien** ($Y=0\%$).
- Le deuxième seuil enclenche la commande **Tout** ($Y=100\%$).

L'écart entre les deux valeurs (seuils) s'appelle "Hystérésis".



Δ est exprimée en pourcentage de W .

Les deux seuils limitent la fréquence de commutation pour éviter la fatigue des organes de commande.

Chapitre III: Régulateurs Proportionnel, Intégrale, Dérivée

Le régulateur PID (Proportionnel, Intégral, Dérivée) largement utilisé dans le domaine industriel; permettant d'effectuer des asservissements en boucle fermée des processus.

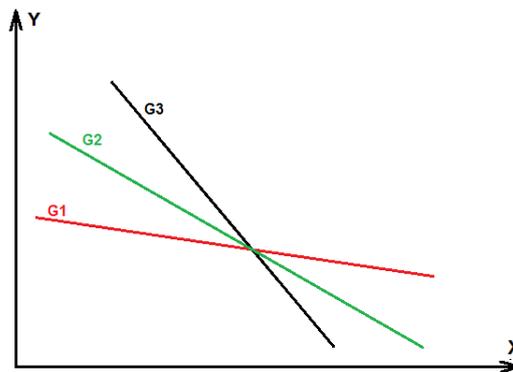
Dans ce chapitre on va présenter les régulateurs: P, PI, PD et PID.

1. L'action Proportionnelle (P):

1.1. Définition:

Un régulateur proportionnel tente de faire mieux que le type On-off en appliquant la puissance en proportion de la différence entre la mesure et la consigne. À mesure que le gain augmente, le système réagit plus rapidement aux changements de la consigne.

Il existe une relation linéaire entre la variable réglée X et la grandeur réglante Y . Plus X s'écarte du point de consigne W , plus le signal d'erreur ε augmente et plus Y change pour corriger cet écart.

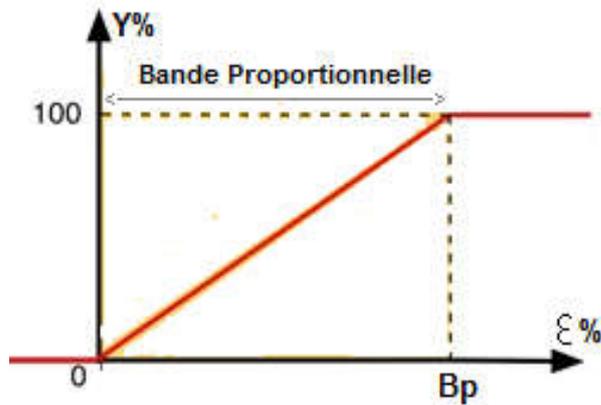


Le gain G représente le rapport entre la variation de la sortie du régulateur et celle de l'entrée.

1.2. Bande proportionnelle:

La bande proportionnelle Bp c'est la variation de l'écart ($\varepsilon = W - X$) en pourcent qui produit une variation de 100% de la sortie (commande) de régulateur.

$$\boxed{Y_{\%} = 100 \frac{\varepsilon}{Bp}} ;$$



1.3. Equation:

L'entrée du régulateur reçoit l'écart ($\varepsilon = W - X$) puis le régulateur donne comme sortie (commande):

$$Y = K_p(W - X) + Y_0$$

Y_0 : une constante fixée de telle façon : $W = X$.

1.4. Fonction de transfert:

Le régulateur **P** construit une commande $u(t)$ proportionnelle à l'erreur $\varepsilon(t)$.

La loi de commande du régulateur **P** est donnée par:

$$u(t) = K_p \varepsilon(t) \quad \text{où la transformée de Laplace donne : } U(p) = K_p E(p)$$

La fonction de transfert du régulateur:

$$C(p) = \frac{U(p)}{E(p)} = K_p$$

K_p : le gain proportionnel.

Le schéma fonctionnel du régulateur **P** est représenté par:

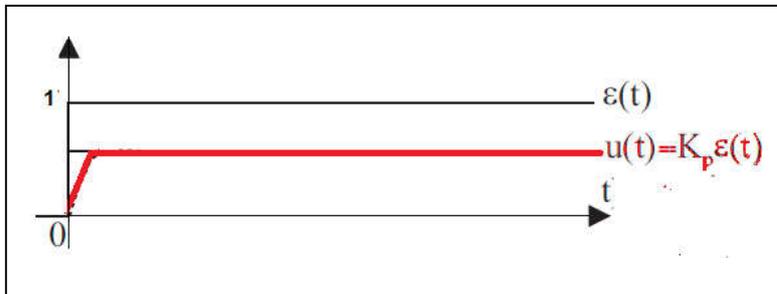


Remarque: L'action proportionnelle s'exprime soit par le gain proportionnel K_p , soit par la bande proportionnelle B_p exprimée en pourcentage.

$$B_{p\%} = \frac{100}{K_p}$$

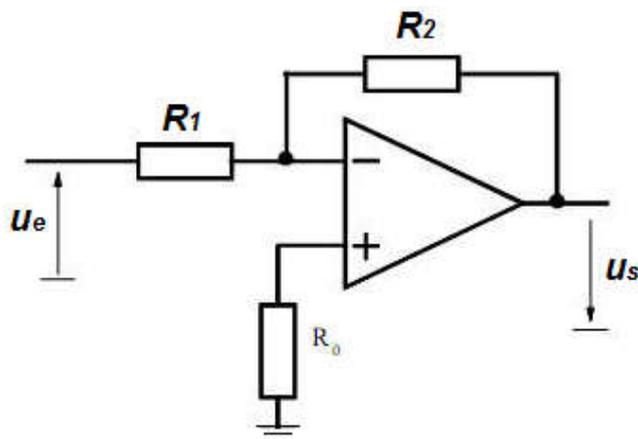
Par exemple pour $K_p = 2$ ou bien $B_p = 50\%$ signifie qu'une variation de 50% de $\varepsilon(t)$ entraîne une variation de 100% de $u(t)$.

La réponse indicielle du régulateur P est schématisé par:



1.5. Réalisation électronique de régulateur P:

Le régulateur proportionnel peut être réalisé à base d'un amplificateur opérationnel selon le montage suivant:



On peut écrire la relation générale au nœud négatif de l'amplificateur

$$u_e \frac{1}{R_1} = u_s \frac{1}{R_2}$$

Alors la fonction de transfert est donnée par

$$C(p) = \frac{U_s(p)}{U_e(p)} = \frac{R_2}{R_1} = K_p$$

.1.6. Avantages et inconvénients de l'action proportionnelle:

1.6.1 Avantages:

- Le régulateur P a une action instantanée et dynamique
- L'action proportionnelle dépend seulement de la valeur de l'erreur.

1.6.2. Inconvénients:

- Un gain K_p faible assure un système stable mais une erreur statique importante.
- Un grand gain K_p donne une petite erreur statique mais aussi un système instable en régime transitoire.
- Une limitation du régulateur P c'est que $\varepsilon(t)$ ne doit pas être nulle en régime permanent, pour avoir une commande non nulle.

$$u(t) \neq 0 \Rightarrow K_p \cdot \varepsilon(t) \neq 0 \Leftrightarrow \varepsilon(t) \neq 0, \forall t$$

2. L'action Proportionnelle et Intégrale (PI):

2.1. Principe:

La relation entre le signal d'entrée (l'erreur) et le signal de sortie (la commande) est donnée par:

$$u(t) = K_p \varepsilon(t) + K_i \int_0^t \varepsilon(\tau) d\tau$$

La transformée de Laplace donne:

$$U(p) = K_p E(p) + \frac{K_i}{p} E(p)$$

2.2. Fonction de transfert:

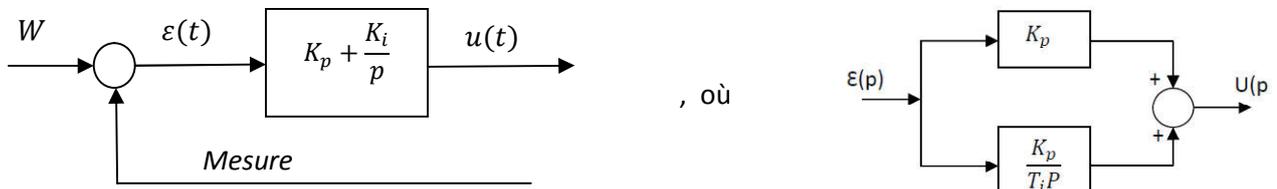
La fonction de transfert du régulateur:

$$C(p) = \frac{U(p)}{E(p)} = K_p + \frac{K_i}{p}$$

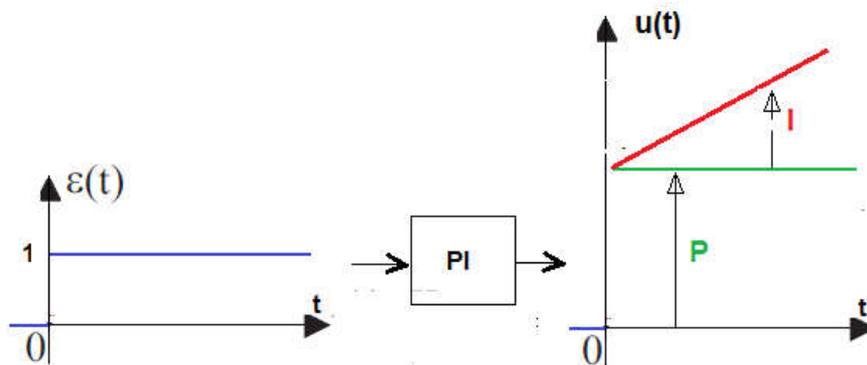
$$C(p) = K_p \left(1 + \frac{K_i}{K_p p} \right) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i p} \right) = K_p \left(\frac{1 + T_i p}{T_i p} \right)$$

Où K_p : gain proportionnel; K_i : gain intégral, T_i : constante du temps d'intégration.

Le schéma fonctionnel du régulateur PI est donné par:

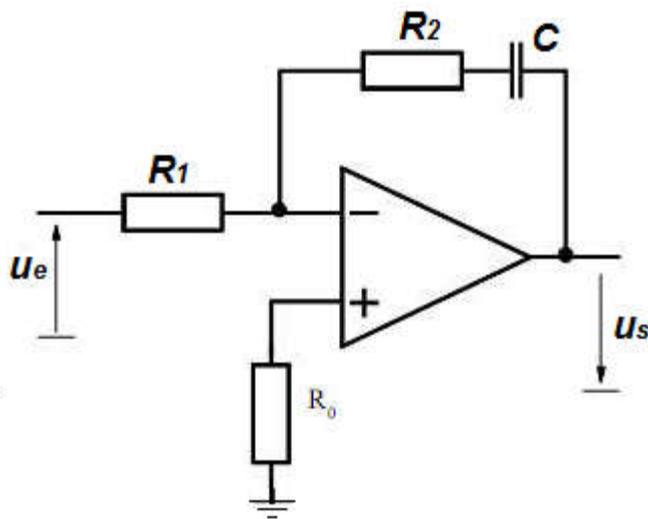


La réponse indicielle du régulateur PI est peut être schématisé par:



2.3.Réalisation électronique de régulateur PI:

Le schéma électronique d'un correcteur PI est représenté par:



Il possède un circuit de contre-réaction formé d'un condensateur C mis en série avec la résistance R_2 .

On peut écrire la relation générale au nœud négatif de l'amplificateur,

$$u_e \frac{1}{R_1} = u_s \frac{Cp}{1 + R_2 Cp}$$

La fonction de transfert est donnée par:

$$C(p) = \frac{U_s(p)}{U_e(p)} = \frac{R_2}{R_1} \frac{1 + R_2 Cp}{R_2 Cp} = K_p \frac{1 + T_i p}{T_i p}$$

2.4. Avantages et inconvénients de l'action proportionnelle:

2.4.1 Avantages:

Pour un système de premier ordre, le régulateur PI

- Permet d'annuler l'erreur statique.
- Améliore donc la précision statique.
- Rejette les perturbations de type échelon.

2.4.2. Inconvénients:

Le régulateur PI:

- Possède certaines limitations sur l'amélioration de la rapidité.
- Peut introduire une instabilité du système en boucle fermée.

3. L'action Proportionnelle et Dérivée (PD):

3.1. Principe:

La relation entre le signal d'entrée (l'erreur) et le signal de sortie (la commande) est donnée par:

$$u(t) = K_p \varepsilon(t) + K_d \frac{d\varepsilon(t)}{dt}$$

La transformée de Laplace donne:

$$U(p) = K_p E(p) + K_d p E(p)$$

3.2. Fonction de transfert:

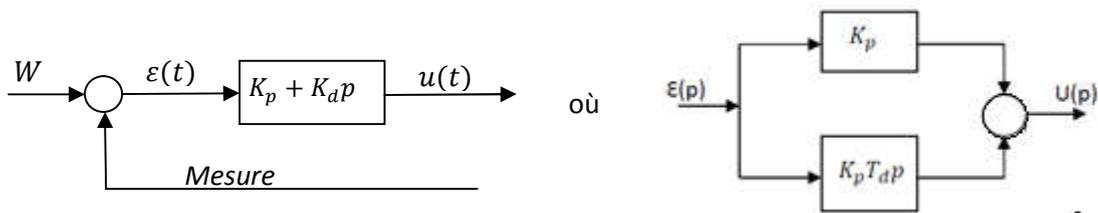
La fonction de transfert du régulateur:

$$C(p) = \frac{U(p)}{E(p)} = K_p + K_d p$$

$$C(p) = K_p \left(1 + \frac{K_d}{K_p} p \right) = K_p (1 + T_d p)$$

Où K_p : gain proportionnel; K_i : gain dérivée, T_i : constante du temps de dérivation.

Le schéma fonctionnel du régulateur PD est donné par:

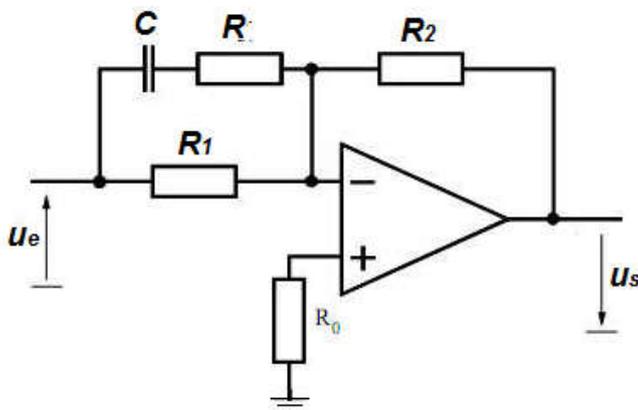


3.3. Le rôle de l'action dérivée:

- Elle accélère la réponse du système et améliore la stabilité de la boucle.
- Elle assure un amortissement rapide des oscillations .
- Dans l'industrie l'action dérivée est utilisée pour le réglage des variables lentes (par exemple la température).

3.4. Réalisation électronique de régulateur PD:

Toujours et avec l'utilisation de l'amplificateur opérationnel le schéma électronique d'un correcteur PD peut être donné par:



On peut écrire la relation générale au nœud négatif de l'amplificateur

$$u_e \frac{1 + (R + R_1)Cp}{1 + RCp} \frac{1}{R_1} = u_s \frac{1}{R_2}$$

D'où la fonction de transfert sera:

$$C(p) = \frac{U_s(p)}{U_e(p)} = \frac{R_2}{R_1} \left(\frac{1 + (R + R_1)Cp}{1 + RCp} \right)$$

4. Correcteur à action proportionnelle, Intégrale et dérivée (PID):

C'est le correcteur le plus connu et aussi le plus complet car il permet de réaliser des performances telles que la stabilité, la rapidité et la précision grâce à la combinaison des trois actions P, I et D.

Action proportionnelle (P) : Elle assure la rapidité, l'erreur est multipliée par un gain K_p .

Sur la plupart des correcteurs, on règle la bande proportionnelle (BP%) au lieu de régler le gain du correcteur.

Action intégrale (I) : Elle annule l'erreur statique. L'erreur est intégrée et divisée par un gain T_i

Action Dérivée (D) : Elle améliore la stabilité, l'erreur est dérivée et multipliée par un gain T_d .

4.1. Principe:

La relation entre le signal d'entrée (l'erreur) et le signal de sortie (la commande) est donnée par:

$$u(t) = K_p \varepsilon(t) + K_i \int_0^t \varepsilon(\tau) d\tau + K_d \frac{d\varepsilon(t)}{dt}$$

La transformée de Laplace donne:

$$U(p) = K_p E(p) + \frac{K_i}{p} E(p) + K_d p E(p)$$

4.2.Fonction de transfert:

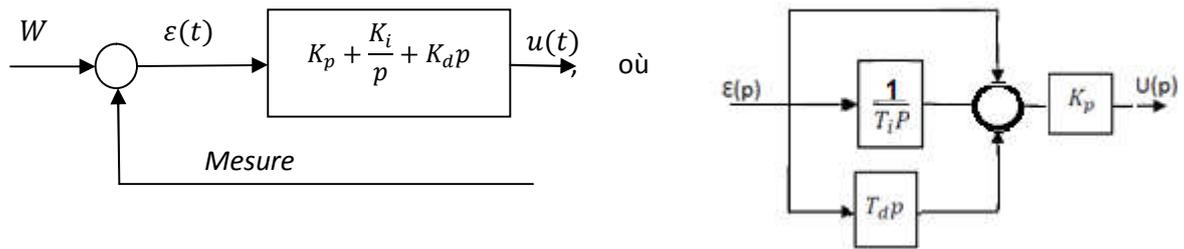
La fonction de transfert du régulateur PID:

$$C(p) = \frac{U(p)}{E(p)} = K_p + \frac{K_i}{p} + K_d p$$

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

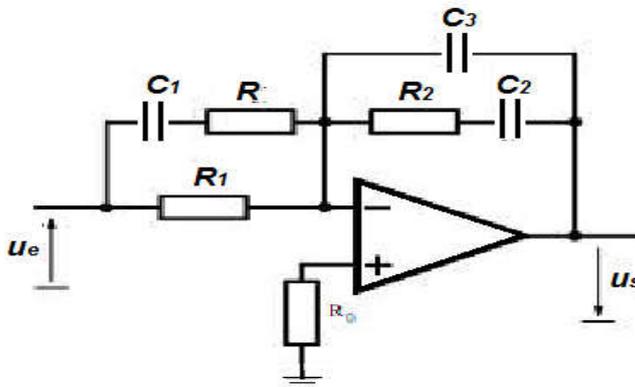
$$C(p) = K_p \frac{T_d T_i p^2 + T_i p + 1}{T_i p}$$

Le schéma fonctionnel du régulateur PID est donné par:



4.3. Réalisation électronique de régulateur PID:

Plusieurs méthodes ont été proposées pour réaliser un correcteur PID, la figure suivante représente une de ces méthodes:



On peut écrire la relation générale au nœud négatif de l'amplificateur

$$u_e \frac{1 + (R + R_1)C_1 p}{1 + RC_1 p} \frac{1}{R_1} = u_s \frac{1 + R_2 \frac{C_2 C_3}{C_2 + C_3} p}{1 + R_2 C_2 p} p C_2 C_3$$

Et la fonction de transfert est donnée par:

$$C(p) = \frac{U_s(p)}{U_e(p)} = \frac{R_2}{R_1} \frac{C_2 C_3}{C_2 + C_3} \frac{(1 + R_2 C_2 p)(1 + (R + R_1) C p)}{R_2 C_2 p \left(1 + R_2 \frac{C_2 C_3}{C_2 + C_3} \right) (1 + RC_2 p)}$$

4.4. Régulateur PID pour un système de premier ordre:

Soit un système de premier ordre représenté par la fonction de transfert:

$$F(p) = \frac{1}{1 + \tau p}$$

La régulation en boucle fermée de ce système en utilisant un régulateur PID de fonction de transfert $C(p)$ donne la fonction de transfert en boucle fermée suivante:

$$H(p) = \frac{C(p).F(p)}{1+C(p).F(p)}$$

Si on remplace $C(p)$ en fonction de K_p , K_i et K_d ; on obtient

$$H(p) = \frac{K_d p^2 + K_p p + K_i}{(K_d + \tau)p^2 + (K_p + 1)p + K_i}$$

Le système réglé a une pulsation:

$$\omega = \sqrt{\frac{K_i}{K_d + \tau}}$$

et un coefficient d'amortissement:

$$\xi = \frac{(K_p + 1)}{2\sqrt{K_i(K_d + \tau)}}$$

4.4. Résumé des actions P, I et D:

Les effets des actions proportionnelle, intégrale et dérivée pendant les régimes transitoire et permanent sont regroupés sur le tableau suivant:

	Temps de montée t_m	Dépassement D%	Temps de réponse t_r	Erreur statique
Si K_p croit	Diminue	Augmente	Peu de changement	Diminue
Si K_i croit	Diminue	Augmente	Augmente	Éliminée
Si K_d croit	Peu de changement	Diminue	Diminue	Peu de changement

La question ici est comment choisir les valeurs de K_p , K_i et K_d ? Est comment on peut les ajustés.

Il existe des méthode analytiques permettant de calculer les composants du correcteur PID, mais elles sont complexes et peu utilisées.

Des méthodes empiriques plus simples sont aussi utilisées (Méthodes de Ziegler-Nichols, Méthode de Chien-Hrones-Reswick,...etc).

Chapitre IV: Choix et dimensionnement des régulateurs PID

En 1942, Ziegler et Nichols ont proposé deux approches expérimentales pour ajuster rapidement les paramètres des régulateurs P, PI et PID.

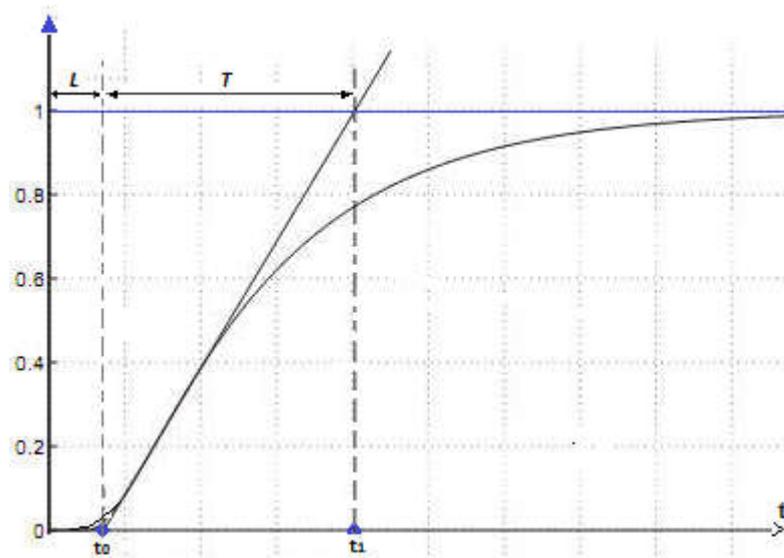
Les méthodes de Ziegler-Nichols sont appliquées seulement pour les systèmes apériodiques (sans comportement oscillant).

1. Méthode de Ziegler-Nichols en boucle ouverte:

Soit un système apériodique de fonction de transfert $G(p)$.

Pour obtenir les paramètres des régulateurs P, PI et PID, il suffit de:

- 1) Enregistrer la réponse indicielle du système (sans régulateur).
- 2) Tracer la tangente au point d'inflexion de la courbe.
- 3) Déterminer le point d'intersection entre la tangente et l'axe de temps t_0 puis l'instant t_1 correspond à l'intersection de la tangente avec la droite ($y = 1$).
- 4) Mesurer la durée entre zéro et t_0 et la nommée L , puis mesurer la durée entre t_1 et t_0 et la nommée T .



En utilisant L et T obtenus, on construit le tableau des paramètres K_p , T_i et T_d

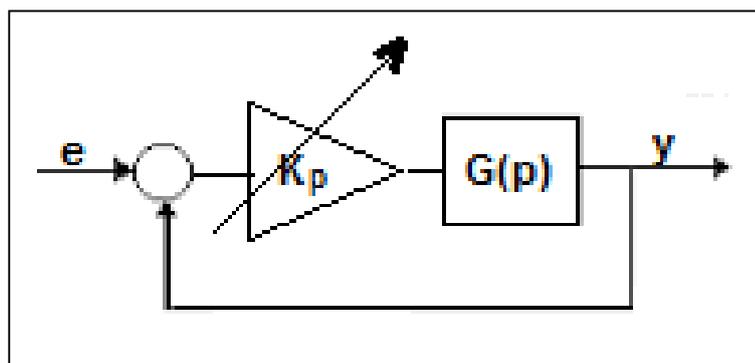
	K_p	T_i	T_d
P	$\frac{T}{L}$	∞	0
PI	$0.9 \frac{T}{L}$	$\frac{L}{0.3}$	0
PID	$1.2 \frac{T}{L}$	$2L$	$0.5L$

2. Méthode de Ziegler-Nichols en boucle fermée:

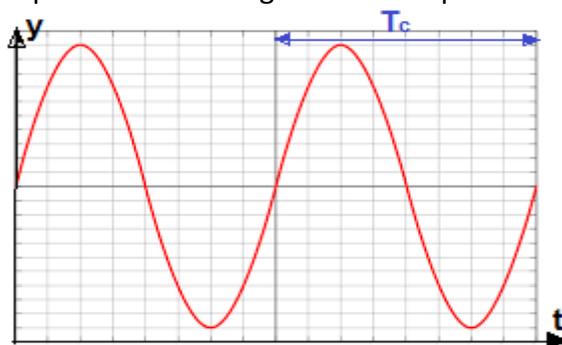
Si on n'a pas accès à la boucle ouverte du système, Ziegler et Nichols nous propose une méthode en boucle fermée qui consiste à déterminer la limite de pompage du système en boucle fermée. Le pompage est défini par l'apparition d'oscillations entretenues.

En utilisant un régulateur proportionnel de fonction de transfert:

$$C(p) = K_p \text{ avec } K_p \text{ variable.}$$



- 1) $C(p) = K_p$ donc $T_i = \infty$ et $T_d = 0$.
- 2) On augmente K_p jusqu'à l'obtention de la juste oscillation (la limite de stabilité) K_p ici est dit K_p critique $K_p = K_{pc}$.
- 3) On relève K_{pc} et la période T_c de l'oscillation de la réponse.
- 4) Les paramètres du régulateur sont présentés sur le tableau suivant:



	K_p	T_i	T_d
P	$0.5K_{pc}$	∞	0
PI	$0.45K_{pc}$	$\frac{1}{1.2} T_c$	0
PID	$0.6K_{pc}$	$0.5T_c$	$0.125T_c$