Chapitre 1

Introduction à la régulation industrielle

1. Définition de la régulation industrielle

- Les systèmes automatiques assurent en fait 2 types de fonctions :
  1- Maintenir la grandeur commandée, ou grandeur réglée, à une valeur de référence malgré les variations des conditions extérieurs ; on parle de la régulation en sens strict.
  2- Répondre à des changements d'objectif, ou à un objectif variable tel que la poursuite de cible, on parle d'un fonctionnement d'asservissement
- La régulation industrielle est la technique de l'ingénieur offrant les méthodes/outils nécessaires à la prise de contrôle d'un système physique (installation de production, robot, alimentation électronique stabilisée, etc.) en vue d'en imposer le comportement. Cette prise de contrôle s'effectue par l'intermédiaire de certains signaux (grandeurs physiques) qu'il est alors nécessaire de mesurer afin de déterminer l'action à entreprendre sur le système. Le contrôle est automatique, i.e. aucune intervention humaine n'est nécessaire.
- La régulation des processus industrielle regroupe l'ensemble des moyennes matérielles et techniques mises en œuvre pour maintenir une grandeur physique ***à réglée*** égale à une valeur désirée appelée ***consigne,*** sans intervention humain. Lorsque des perturbations ou des changements de consigne se produisent, la régulation provoque une action correctrice sur une grandeur physique du procédé appelée ***grandeur réglante***

Exemple de grandeurs physiques : pression, température, tension, débit, niveau, PH ? concentration……

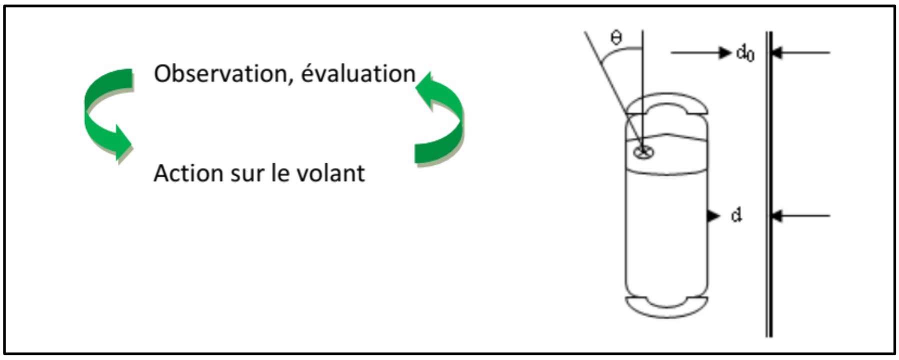
But de la régulation automatique :

La régulation est l'action de régler automatiquement une grandeur de telle sorte que celle-ci garde constamment sa valeur ou reste proche de la valeur désirée, quelles que soient les perturbations qui peuvent subvenir.

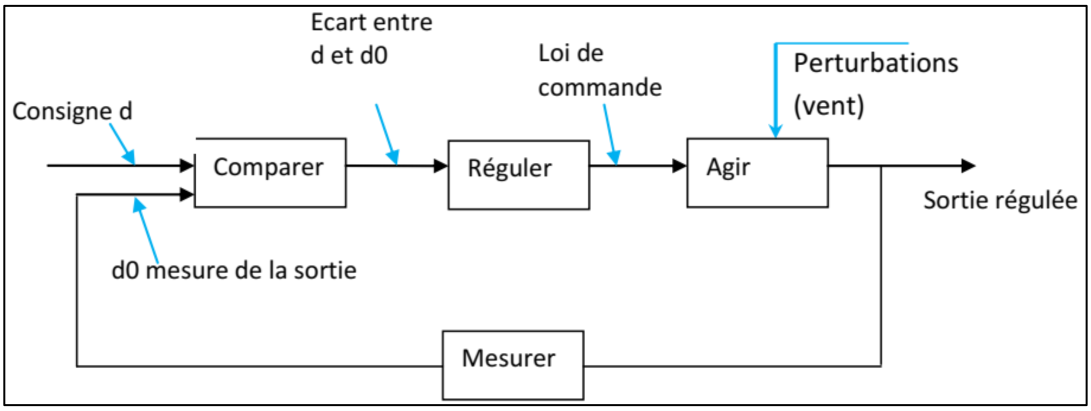
- Analyser un procédé industriel, c'est connaître sa réaction naturelle face à une perturbation.
- Le procédé étant inclus dans une boucle ou une chaîne de régulation, la connaissance de son comportement permet de définir le correcteur associé à ce procédé, le but étant d'assurer la stabilité de l'ensemble

2-- Exemple introductif :

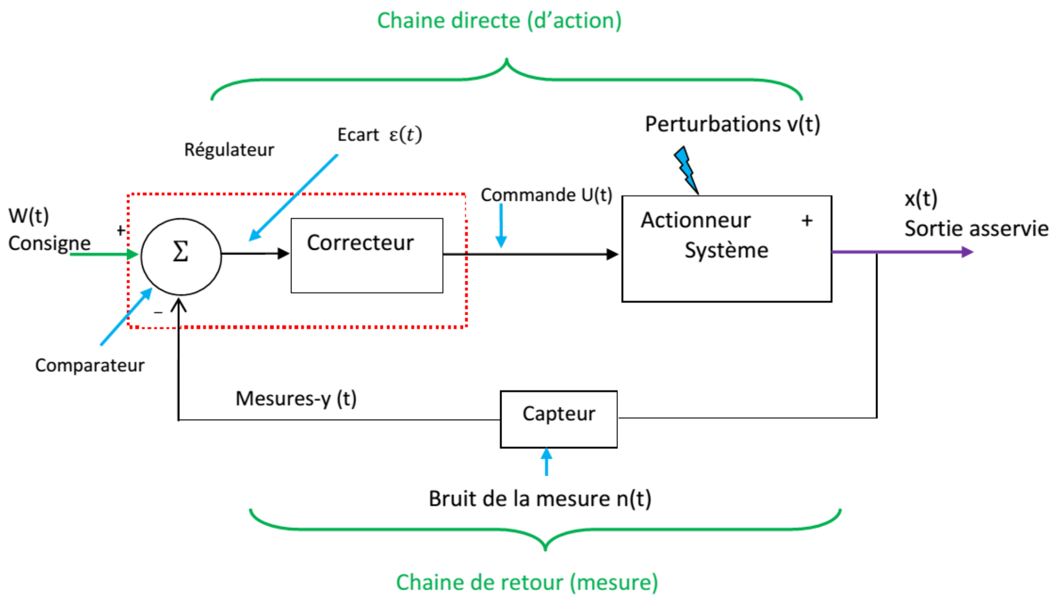
Conducteur au volant d'un véhicule :



- Le conducteur doit suivre la route en se fixant pour objectif de laisser une distance d0 entre le véhicule et le bord de la route schématisé par un trait (consigne).
- Pour se faire, Il observe la route et son environnement et évalue la distance qui sépare son véhicule du bord de la route.
- Il détermine en fonction de sa position actuelle l'angle qu'il doit donner au volant pour maintenir son objectif pendant toute la durée du déplacement.
- Si un coup de vent dévie le véhicule (perturbation), le conducteur agit pour s'opposer à cette perturbation



3-- Organes d'une boucle de régulation



Fonctionnel d'une boucle de régulation

- **Les éléments :**

- **Comparateur :** Compare en permanence ce que l'on obtient à ce que l'on souhaite obtenir en sortie (élabore le signal d'erreur $\varepsilon(t) = W(t) - y_m(t)$),
- **Régulateur :** Traite le signal l'erreur $\varepsilon(t)$ et détermine le signal de commande u(t) destiné à diminuer l'erreur $\varepsilon(t)$
- **Actionnaire :** Il reçoit du correcteur le signal de commande et agit directement sur le système à régler. Il représente le "muscle" qui va piloter l'évolution du système (par exemple : amplificateur de puissance, moteur, vérin, vanne, etc ...),
- **Capteur :** organe de mesure qui donne une image aussi fidèle que possible de la sortie y(t) et la transforme en un signal compréhensible par le comparateur (le plus souvent électrique).

- **Les signaux :**

- **Consigne :** Signal à poursuivre, à caractère déterministe, elle correspond à la valeur souhaitée en sortie, ce signal est défini pour une application donnée.
- **Grandeur réglée :** C'est la grandeur physique que l'on désire contrôler. Elle donne son nom à la régulation. Exemple : une régulation de température. Seul une image peut être obtenue, par l'intermédiaire d'un capteur.

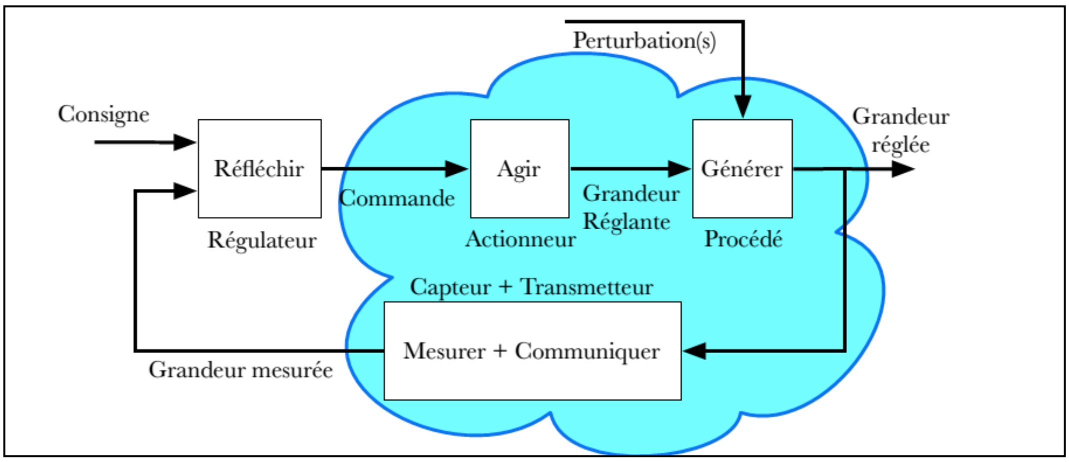
- **Grandeur réglante (grandeur mesurée ou mesure) :** Est la grandeur physique qui a été choisie pour contrôler la grandeur réglée. Est une image de la grandeur réglée fournie par le capteur. C'est la seule information utilisée par régulateur. Elle n'est généralement pas de même nature que la grandeur réglée.
- **Grandeur perturbatrice (Perturbation):** Sont les grandeurs physiques qui influencent la grandeur réglée. Elles ne sont généralement pas de même nature que la grandeur réglée.
- on appelle perturbation tout phénomène physique intervenant sur le système qui modifie l'état de la sortie d'un système régulé.
- **Bruit sur la mesure :** Signal aléatoire représentant le bruit intervenant sur la mesure
- **Erreur ou écart :** représente la différence entre la consigne et la grandeur réglante. $\varepsilon(t) = W(t) - y_m(t)$

➢ **Les servomécanismes :** On appelle servomécanisme, un système asservi dont le rôle consiste à amplifier la puissance et dont la grandeur réglée est une grandeur mécanique tel qu'un effort, un couple, la position ou l'une de ses dérivées par rapport au temps, comme la vitesse et l'accélération

➢ **Instruments périphériques :**

- Fonction de tendance (direction): **Indicateur**
- Fonction de mémorisation : **Enregistreur**
- Fonction de calcul : **Sommation, multiplication, division, racine carrée intégrateur…**
- Fonction de sécurité : **Pressostat, alarme, relais à seuil…**

4-- Principe de fonctionnement :



Pour réguler un système physique, il faut :

- Mesurer la grandeur réglée avec un capteur.
- Réfléchir sur l'attitude à suivre : c'est la fonction du régulateur. Le régulateur compare la grandeur mesurée avec la consigne et élabore le signal de commande.
- Agir sur la grandeur réglante par l'intermédiaire d'un organe de réglage.

- Il faut donc commencer par mesurer les principales grandeurs servant à contrôler le processus.
- L'organe de régulation récupère ces mesures et les compare aux valeurs souhaitées, plus communément appelées valeurs de consigne.
- En cas de non-concordance des valeurs de mesure et des valeurs de consigne, l'organe de régulation envoie un signal de commande à l'organe de contrôle (vanne, moteur, etc.), afin que celui-ci agisse sur le processus.
- Les paramètres qui régissent le processus sont ainsi stabilisés en permanence à des niveaux souhaités.

4-- Régulation et asservissement :

- **Régulation :** On appelle régulation un système asservi (en BF) qui doit maintenir constante la sortie (conformément à la consigne et indépendamment des perturbations (ex : climatiseur, régulation de température…)
- **Asservissement :** On appelle asservissement un système asservi dont la sortie dépend (doit suivre) le plus fidèlement la consigne (consigne variable) (position : asservissement de position).

5. Fonctionnement d'une chaine de régulation.

- L'ordre w(t) donné en entrée est comparé avec l'image y(t) de la sortie fournie par le capteur.
- Le signal e(t) obtenu en sortie du comparateur va permettre de commander la chaîne d'action composée de deux éléments principaux, le correcteur et l'actionneur. Le rôle du correcteur est d'adapter le signal d'erreur afin d'obtenir une réponse optimale de l'actionneur. Les critères choisis peuvent être divers mais essentiellement basés sur la précision, la rapidité, et la stabilité.

- L'actionneur est chargé de réaliser l'action demandée par l'ordre d'entrée, à partir du signal de sortie du correcteur. C'est en général l'élément qui apporte la puissance pour l'action.
- En cas de phénomènes perturbateurs v(t) agissant sur la grandeur de sortie x(t) l'obligeant à s'écarter de sa valeur désirée, le capteur rend compte au régulateur de l'état de la sortie et le processus de correction est déclenché par le régulateur afin de ramener la grandeur de sortie à sa valeur désirée.

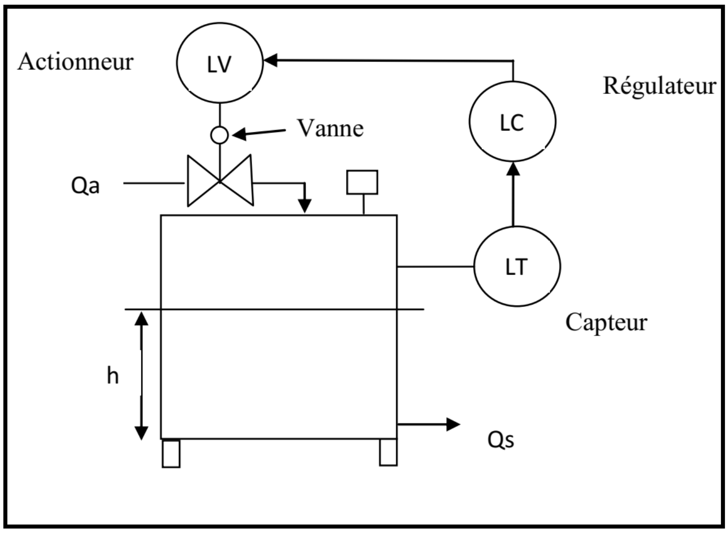
Exemple 2 : Régulation de niveau d'un réservoir:

- Pour effectuer la régulation manuellement nous avons besoin de trois opérateurs.

Observation : Mesurer h et transmission de la mesure.

Réflexion : Reçoit la mesure, comparaison de la mesure avec la consigne, commander l'ouverture de la vanne et transmission de la mesure.

Action : Agir sur la vanne pour modifier le débit Qa, puis retour à l'observation

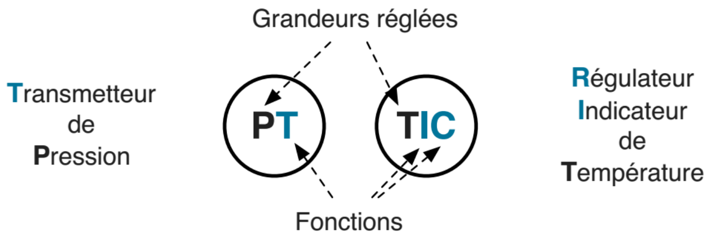


6. Schémas de représentation (Schéma TI ou PCF)

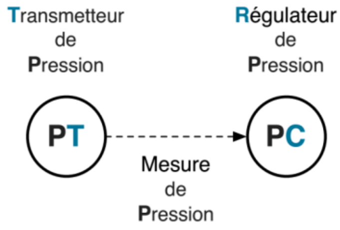
Un schéma **T**uyauterie et **I**nstrumentation (Piping and **I**nstrumentation **D**iagram en anglais, P&ID) est un diagramme qui définit tous les éléments d'un procédé industriels (généralement procédé chimique).

- Les instruments utilisés sont représentés par des cercles entourant des lettres définissant la grandeur physique réglée et leur (s) fonction (s).
- La première lettre définie la grandeur physique réglée, les suivantes la fonction des instruments.

Exemple :



- Les parcours de l'information sont matérialisés par une flèche dont l'allure dépend du support de l'information.



Exemple1 : régulation de pression

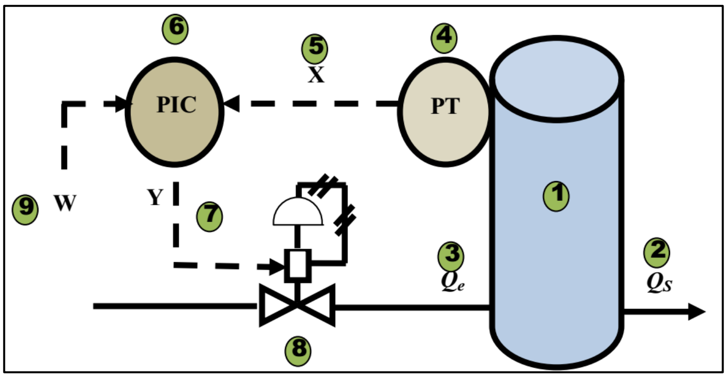
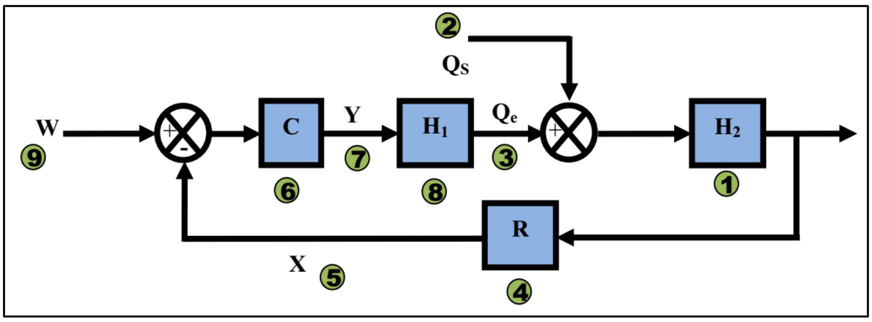


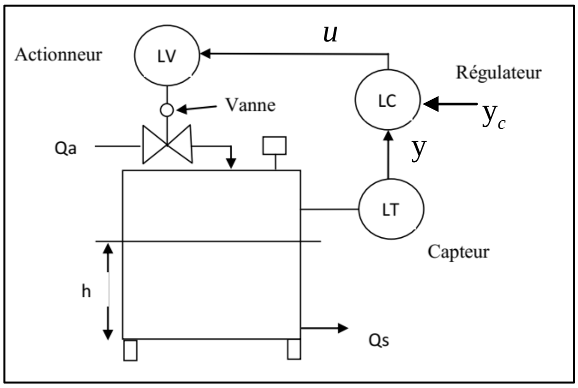
Schéma TI d'une régulation de pression

Le schéma fonctionnel obtenu est le suivant :

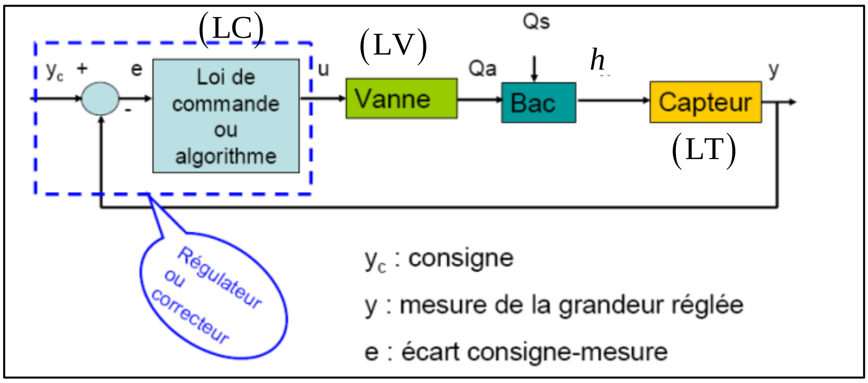


Exemple2 : régulation de pression

Le schéma TI d'une régulation de niveau est donnée comme suit :



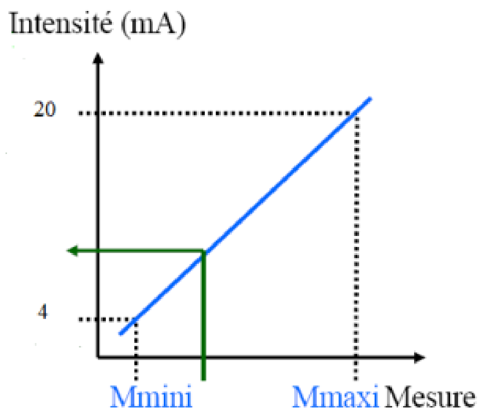
Son schéma fonctionnel peut être représenté comme suit :



7- Les signaux de communication-câblage:

7-1. Signal électrique - Intensité électrique :

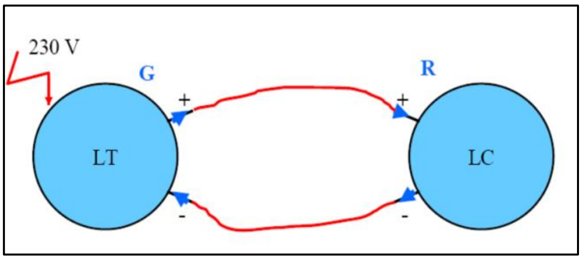
- Les signaux de communication sont en général un courant continu variant de 4 à 20 mA.
- Pour brancher les fils, il faut:
  - Chercher le générateur électrique du 4-20 mA. Si le capteur est passif (il n'est pas alimenté), on installe un générateur externe : Transformateur - Redresseur 220 V AC en 24 V DC. Si le capteur est actif (alimenté en 220 V), c'est lui qui est générateur.



- Placer la flèche du courant en fonction des polarités.

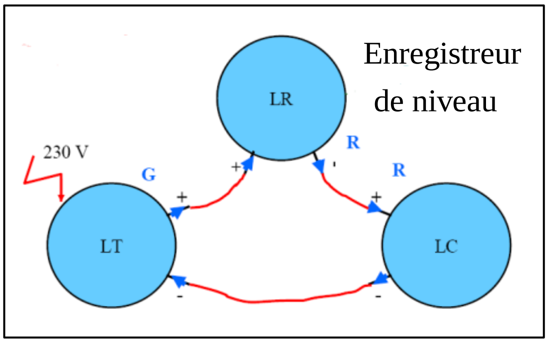
  Convention Générateur : le courant **sort** par la borne PLUS

  Convention Récepteur : le courant **entre** par la borne PLUS



transmetteur de niveau

Régulateur de niveau



Dans le cas où on veut rajouter un enregistreur:

- Le signal électrique, contenant l'information sur M, est émis par le capteur-transmetteur sous forme d'une intensité électrique,
- le courant transite par le régulateur et retourne au capteur puisque la boucle de courant est fermée.
- Le régulateur mesure ce courant lors de son passage et connaît ainsi l'information véhiculée.

7.1-1- Calcule de l'intensité en fonction de la mesure en pourcentage d'échelle

Pour un bac qui peut contenir entre 2 et 8 mètre de liquide :

$$M = \frac{h - h_{\min}}{h_{\max} - h_{\min}}$$

Exemple de mesure (3m) : $h_{\max} = 8m \ et \ h_{\min} = 2m \ : \ M = \frac{3-2}{8-2} = 0.167$

Le capteur mesure : M=16.7%.

Règle : Il y a conservation du pourcentage : (Egalité des Pourcentages) c'est-à-dire M % = I% donc : I=M=0.167

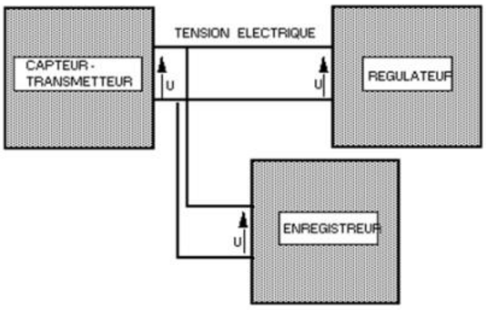
$$I = \frac{i - I_{\min}}{I_{\max} - I_{\min}} = \frac{i-4}{20-4} = 0.167 \Rightarrow i = 6.67mA \ \text{ avec } \ I_{\max} = 20mA \ et \ I_{\min} = 4mA$$

- Le régulateur lit cette intensité et détermine le pourcentage de l'étendue d'intensité.
- La mesure de cette intensité (i=6.67mA) va lui permettre de comprendre que la mesure M est égale à 16.7% de l'étendue d'échelle du capteur.

7-2. Signal électrique - Tension électrique :

- L'information avec ce type de signal est transmise de la même façon que pour le 4-20 mA mais avec maintenant une tension normalisée qui varie de 0 à 10 V ou 0 à 5 V.

- Pour transmettre l'information à l'enregistreur. On va insérer dans la boucle effectuée par la tension d'information notre enregistreur comme suit :

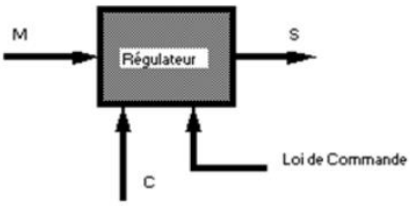


5.4 Signal pneumatique - Pression :

- L'information avec ce type de signal est transmise de la même façon que pour le 4-20 mA mais avec un signal transmis dans ce cas est une pression qui varie entre 0,2 et 1 bar.

5.5. La loi de commande :

- Le rôle du régulateur lorsque la mesure s'écarte de la valeur de consigne, est de déterminer la correction à apporter pour ramener la mesure à sa valeur de consigne.
- Le régulateur reçoit l'information sur la mesure M (%) et possède aussi l'information sur la consigne C.



- Le régulateur calcule d'abord l'écart Mesure - Consigne (M-C), puis la valeur de S telle que : S = f(M-C) où f est la loi de commande ou encore algorithme de contrôle. La loi de commande la plus simple et la plus répandue dans l'industrie est le P.I.D. (Algorithme Proportionnel Intégral Dérivé).

6. Éléments constitutifs d'une boucle de régulation

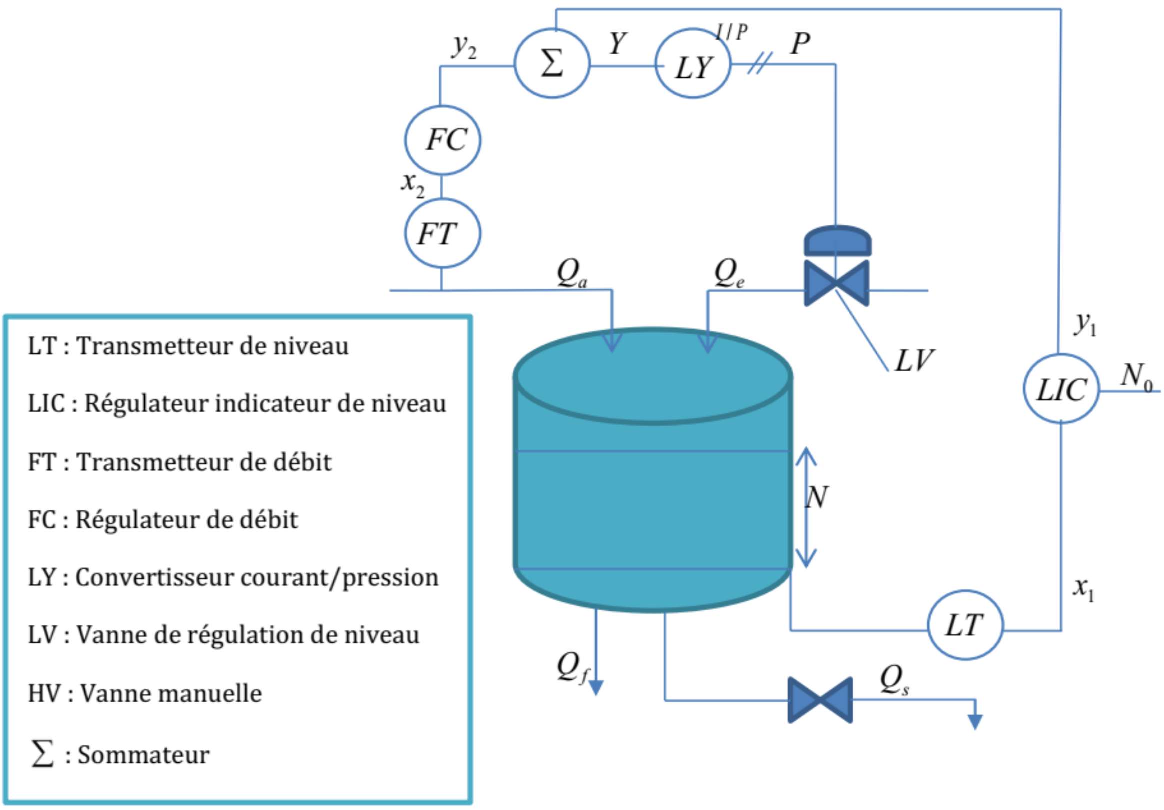
Une boucle de régulation doit comporter au minimum les éléments suivants :

- un capteur de mesure
- un transmetteur souvent intégré au capteur
- un régulateur
- un actionneur

Elle est souvent complétée par :

- un enregistreur
- des convertisseurs
- des sécurités

Exemple de schéma TI d'une régulation de niveau dans un réservoir

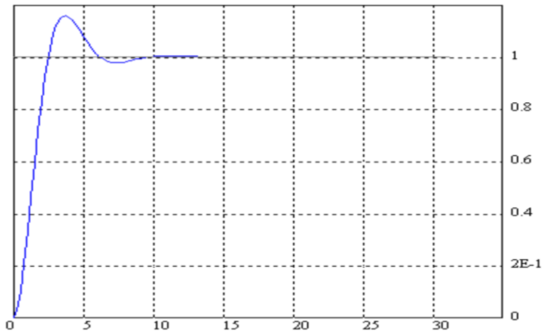


8- Performances d'une régulation industrielle

- Les performances d'une régulation peuvent se définir à partir de l'allure du signal de mesure suite à un échelon de consigne.
- Notons toutefois que les critères de performances classiques peuvent se résumer comme suit :

8-1-Stabilité :

Le système constitué du procédé et de la boucle de régulation est dit stable, si soumis à une variation de consigne, la mesure retrouve un état stable, dans le cas contraire le système est dit instable.

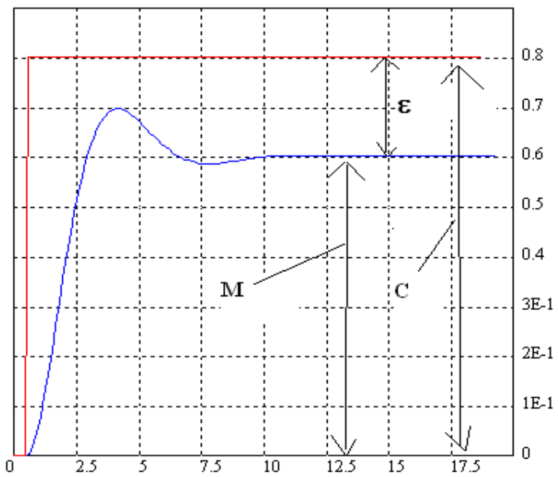


Réponse indicielle d'un système stable

Réponse indicielle d'un système instable

8-2 Précision :

Elle est définit à partir de l'erreur statique ε en régime stable comme le montre la figure suivante :

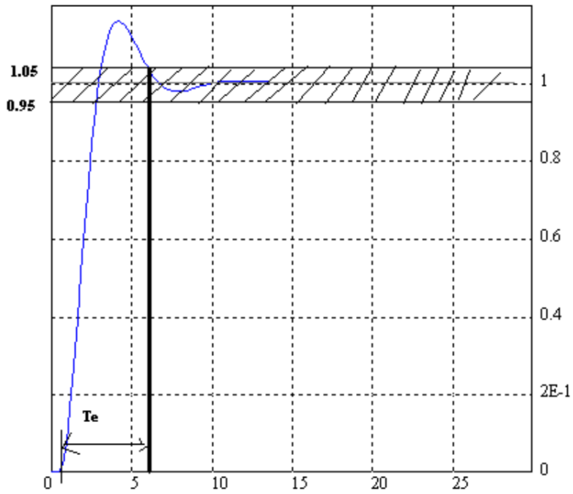


Un système est précis si la sortie suit l'entrée à toutes circonstances.

8-3- Rapidité:

Elle traduit pratiquement la durée transitoire. Plus précisément, elle s'exprime par le temps de réponse Te ou temps d'établissement, qui est le temps mis par la mesure pour atteindre sa valeur définitive à $\pm 5\%$ de sa variation tout en se maintenant dans cette zone des $\pm 5\%$.

Rapidité = temps de réponse Te



Te = 6 s

9- Critères de performance d'une régulation :

- Précision, amortissement, rapidité, permettent d'exprimer les performances d'une régulation.
- En règle générale, on cherche à obtenir un temps de réponse Te et un amortissement par période faibles.

On peut retenir le chiffre de **15%** comme valeur moyenne acceptable de dépassement.

Obtenir un temps de réponse le plus court possible (rapidité, stabilité)

avec la meilleure précision.

Annexe

I- Lettres pour le schéma TI

Premières lettres		Lettres suivantes	
A	Analyse	C	Régulateur
C	Conductivité électrique	E	Elément primaire
D	Masse volumique	I	Indicateur
E	Tension	K	Poste de contrôle
F	Débit	Q	Totalisateur intégrateur
H	Commande manuelle	R	Enregistreur
I	Intensité électrique	S	Contacteur
J	Puissance	T	Transmetteur
K	Temps	V	Vanne de contrôle
L	Niveau	W	Doigt de gant
M	Humidité	Y	Relais de fonction, électrovanne
P	Pression	AH	Alarme haute
S	Vitesse	AHH	Alarme très haute
T	Température	AL	Alarme basse
V	Viscosité	ALL	Alarme très basse
W	Masse	IC	Indicateur régulateur
Z	Position	LH	Signalisation haute
FF	Débit proportionnel	LL	Signalisation basse
LD	Niveau différentiel	RC	Enregistreur régulateur
PD	Pression différentielle	SE	Elément de sécurité
TD	Température différentielle	SV	Elément primaire

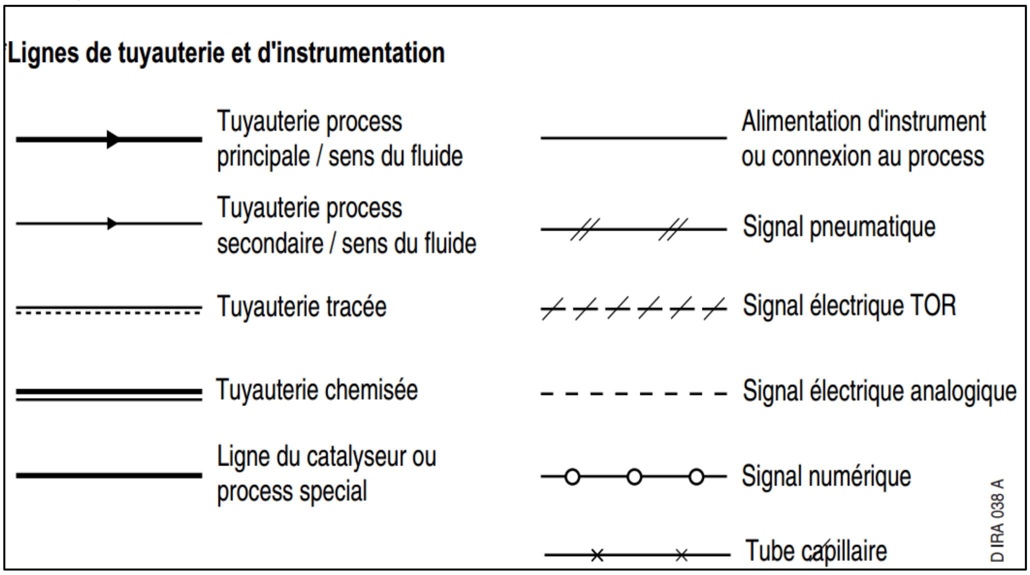
Exemple de combinaisons de lettres

COMBINAISONS IMPOSSIBLES (cases grisées)

Deuxième et troisième lettres – types de service : I = Indicateur ; R = Enregistreur ; C = Régulateur ; IC = Régulateur indicateur ; RC = Régulateur et enregistreur ; CV = Robinet de régulation ; G = Glace uniquement pour observation sans mesure ; A = Alarme ; Q = Totalisateur ; E = Mesure non raccordée ; W = Gaine

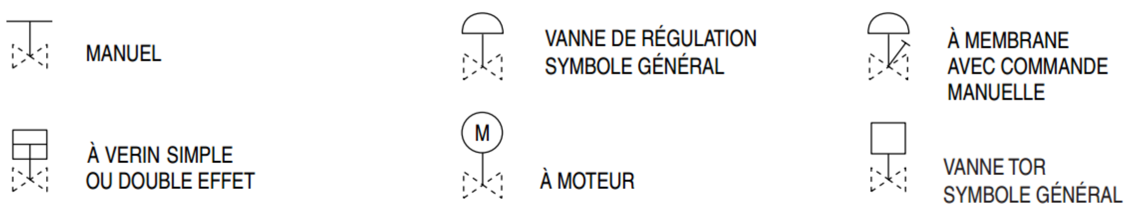
Première lettre Type de mesure ou d'action	I	R	C	IC	RC	CV	G	A	Q	E	W
A Analyseur	AI	AR		AIC	ARC			AA			
B Flamme de brûleur	BI							BA			
C Conductivité	CI	C5		CIC	CRC			CA			
D Masse volumique	DI	DR	DC	DIC	DRC			DA			
E Tension	EI	ER						EA			
F Débit	FI	FR		FIC	FRC		FG	FA	FQ		
G Mesure dimensionnelle						HCV	GG				
H Commande manuelle			HC	HIC				III			
I Intensité	II	IR				KCV		IA	IQ		
K Temps	KI					LCV			KQ		
L Niveau	LI	LR	LC	LIC	LRC		LG	LA			
M Humidité	MI	MR	MC	MIC	MRC	PCV		MA			
P Pression	PI	PR	PC	PIC	PRC			PA			
Q Quantité	QI	QR						QA	QQ		
R Radioactivité	RI	RR				SCV			RQ		
S Vitesse	SI	SR	SC	SIC	SRC	TCV		SA		SE	
T Température	TI	TR	TC	TIC	TRC			TA			TW
V Viscosité	VI	VR		VIC	VRC		VG	VA			
W Poids	WI	WR		WIC	WRC			WA	WQ		

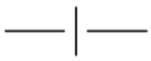
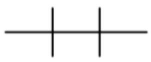
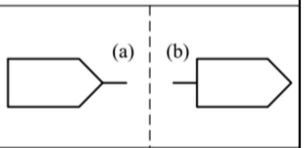
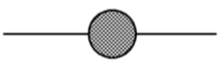
II- Symbolisation



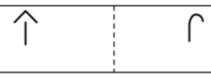
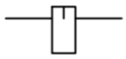
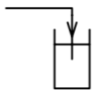
*** Corps de vannes**

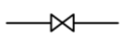
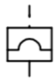
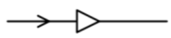
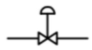
***Actionneurs de vannes**



NOM	SYMBOLE
Tuyauterie de tous types	
Croisement de tuyauterie (sans raccordement)	
Croisement de tuyauterie (avec raccordement)	
Sens d'écoulement	
Pente de tuyauterie	
Entrée de tuyauterie (a) Sortie de tuyauterie (b)	
Isolation thermique sur canalisation	

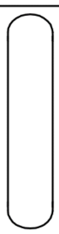
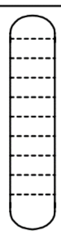
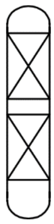
ACCESSOIRES ET ROBINETTERIE

NOM	SYMBOLE
Evacuation	
Respiration	
Pulvérisation par rampe	
Regard d'écoulement	
Arrêt flamme	
Adsorbeur	
Piège à vide	
Garde hydraulique	
Siphon	

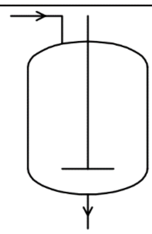
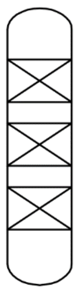
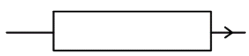
NOM	SYMBOLE
Robinet(symbole général)	
Disque de rupture	
Soupape de sureté	
Purgeur	
Clapet de non retour	
Robinet de régulation	
Détendeur	

COLONNES ET REACTEURS

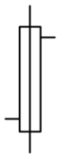
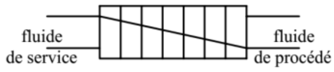
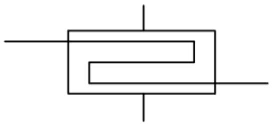
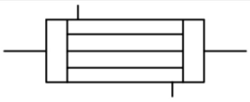
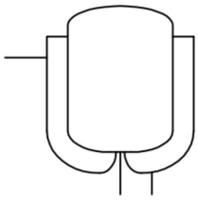
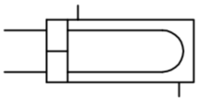
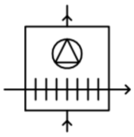
COLONNES
(Absorption, rectification, extraction)

NOM	SYMBOLE	
Colonne vide (a) Colonne à plateaux (b)	**(a)** 	**(b)** 
Colonne à garnissage (c) Colonne à garnissage à deux tronçons (d)	**(c)** 	**(d)** 

REACTEURS

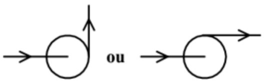
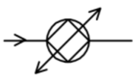
NOM	SYMBOLE	NOM	SYMBOLE
Réacteur agité		Réacteur à lit catalytique	
Réacteur tubulaire			

ECHANGEURS DE CHALEUR

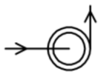
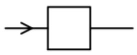
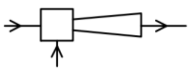
NOM	SYMBOLE	NOM	SYMBOLE
Echangeur tubulaire (liebig)		Echangeur à plaques	
Epingle		Serpentin	
Faisceau tubulaire		Cuve à double enveloppe	
Faisceau à tubes en U			
Aéroréfrigérant			

MANUTENTION DES FLUIDES

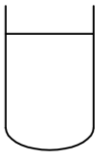
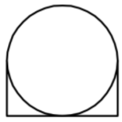
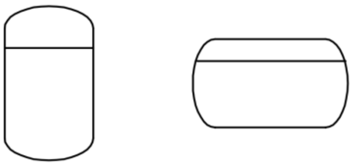
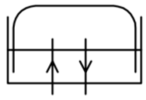
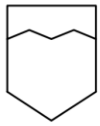
LIQUIDES

NOM	SYMBOLE
Pompe centrifuge	
Pompe volumétrique	
Pompe doseuse	

GAZ

NOM	SYMBOLE
Compresseur volumétrique	
Compresseur centrifuge	
Ventilateur	
Pompe à vide	
Ejecteur	

RESERVOIRS

NOM	SYMBOLE	NOM	SYMBOLE
Réservoir ouvert		Réservoir sphérique pour gaz sous pression	
Réservoir fermé		Gazomètre	
		Silo	

Chapitre 1

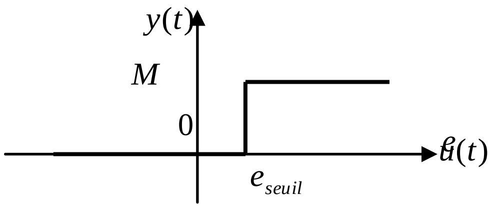
Régulateur tout-ou-rien

1. Régulateur Tout- Ou- Rien TOR standard (sans seuil)

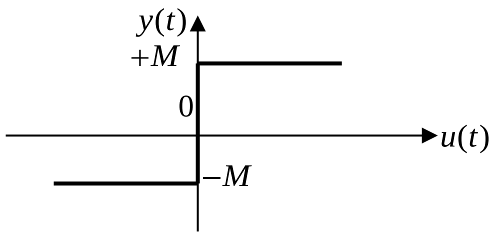
Définition : Un régulateur «tout ou rien» est un régulateur qui élabore une action de commande discontinue qui prend deux positions ou deux états 0 et 1 (ou 0 et 100%). On les appellee on-off control ou two steps controller.

- On trouve par exemple des capteurs de type TOR (tout ou rien) dans l'industrie pour la détection de présence d'objets, ces capteurs ne renverront que deux niveaux logiques :
  0 = absence d'objet 1= présence d'objet
- Le régulateur TOR est caractérisé par la zone morte qui est l'écart entre la consigne haute et la consigne basse.

Exemple : Un interrupteur électrique, un thermostat constituent des dispositifs tout ou rien.



Régulateur TOR simple asymétrique

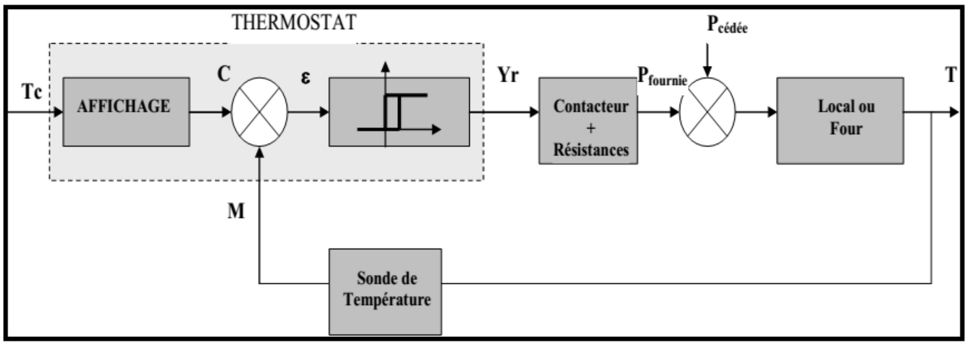


Régulateur TOR sans seuil (idéal)

- Les systèmes qui sont à fonctionnement tout ou rien, sont caractérisés par une sortie ne pouvant prendre que deux (parfois trois) valeurs distinctes.
- La valeur de la sortie est en générale déterminée par l'intervalle dans lequel se trouve la valeur d'entrée.
- Dans ce type de régulateurs, le régulateur commande le système en instantané (TOUT ou RIEN) c'est à dire: Le régulateur correspond à la commutation tout ou rien en fonction du signe de la valeur d'entrée. Lorsque celle-ci est positive (la valeur de

$u(t) > 0$), la sortie du régulateur $y(t)$ prend la valeur fixe $+M$. Elle prend la valeur contraire pour des valeurs négatives de l'entrée (pour $u(t) \leq 0$).

- C'est une régulation discontinue. Sa réalisation impose de se fixer une limite inférieure et une limite supérieure de la grandeur réglée.
- Elle est utilisée quand la dynamique du procédé est très lente (grande constante du temps).
- Les régulateurs tout ou rien sont utilisés pour la commande des systèmes ayant une grande inertie où la précision de régulation n'est pas importante. A titre d'exemple la régulation d'un four à l'aide d'une résistance chauffante.



Régulation TOR de température d'un four

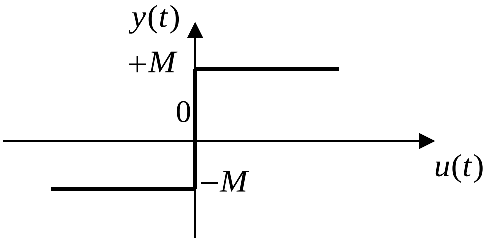
Dans ce type de régulateur, la commande U du correcteur agit sur un relais électromécanique à contact. Dans le cas simple, lorsque U=1, une bobine est excitée et ferme le contact du relais pour alimenter la résistance du chauffage et est désexcitée lorsque U=0 (le contact s'ouvre alors).

Les régulateurs tout ou rien classiques sont par exemple les thermostats et les soupapes (clapets) de sécurité (pressostats) qu'on utilise dans les systèmes de sécurité.

Principe de fonctionnement d'un régulateur TOR idéal

- Lorsque la mesure atteint la limite inférieure, l'actionneur commandé par le régulateur TOR ou tout simplement un relais, prend une position particulière (arrêt ou marche pour une pompe, ouvert ou fermé pour une vanne).
- De façon analogue, le fait d'atteindre la limite supérieure place l'actionneur dans la position contraire.

- La mesure oscille donc entre ces deux valeurs extrêmes et sa variation prend une l'allure en dents de scie. Ce réglage simple, bon marché présente l'inconvénient d'être peu précis

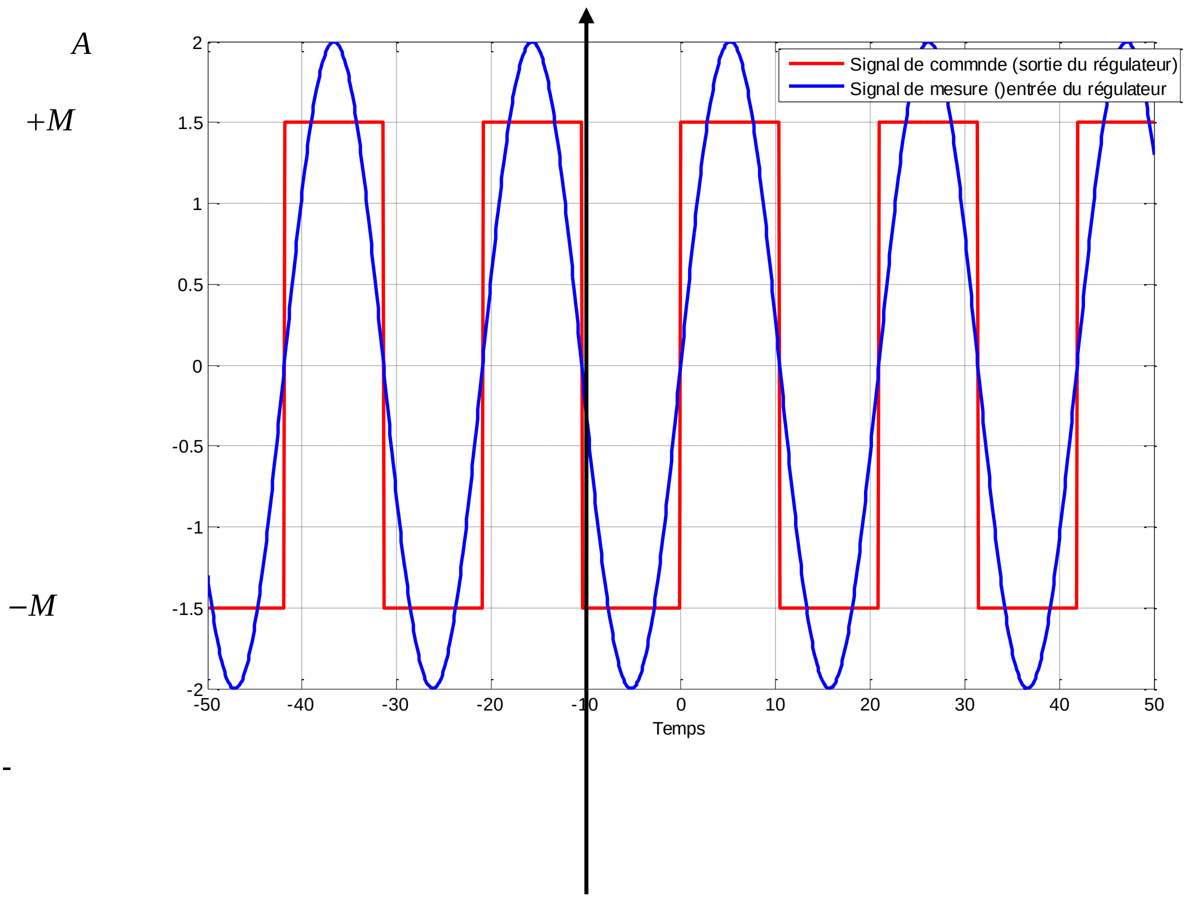


$$y(t)=\begin{cases}+M & si \;\; u(t)>0\\ 0 & si \;\; u(t)=0\\ -M & si \;\; u(t)>0\end{cases}$$

On désir tracer le signal de sortie du régulateur TOR idéal excité par un signal sinusoïdal.

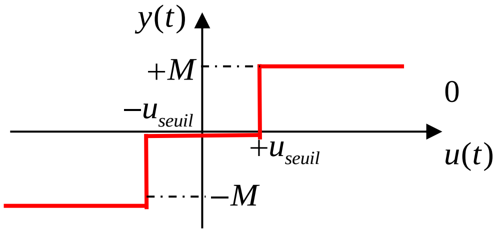
On applique à l'entrée du régulateur une excitation sinusoïdale $u(t)=A\sin(wt)$.

- Tant que la valeur de la mesure $u(t)$ est inférieure à 0 ($u(t)\leq 0$) , la commande $y(t)$ (signal de sortie du régulateur) est de $-M$ (Rien).
- Dès que la mesure $u(t)$ atteint et dépasse 0, la commande $y(t)$ est de $+M$ (Tout)

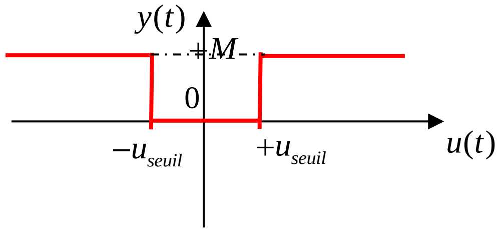


-

2. Régulateur Tout- Ou- Rien TOR avec seuil



(a) :Régulateur TOR avec seuil



(b) : Régulateur TOR symétrique

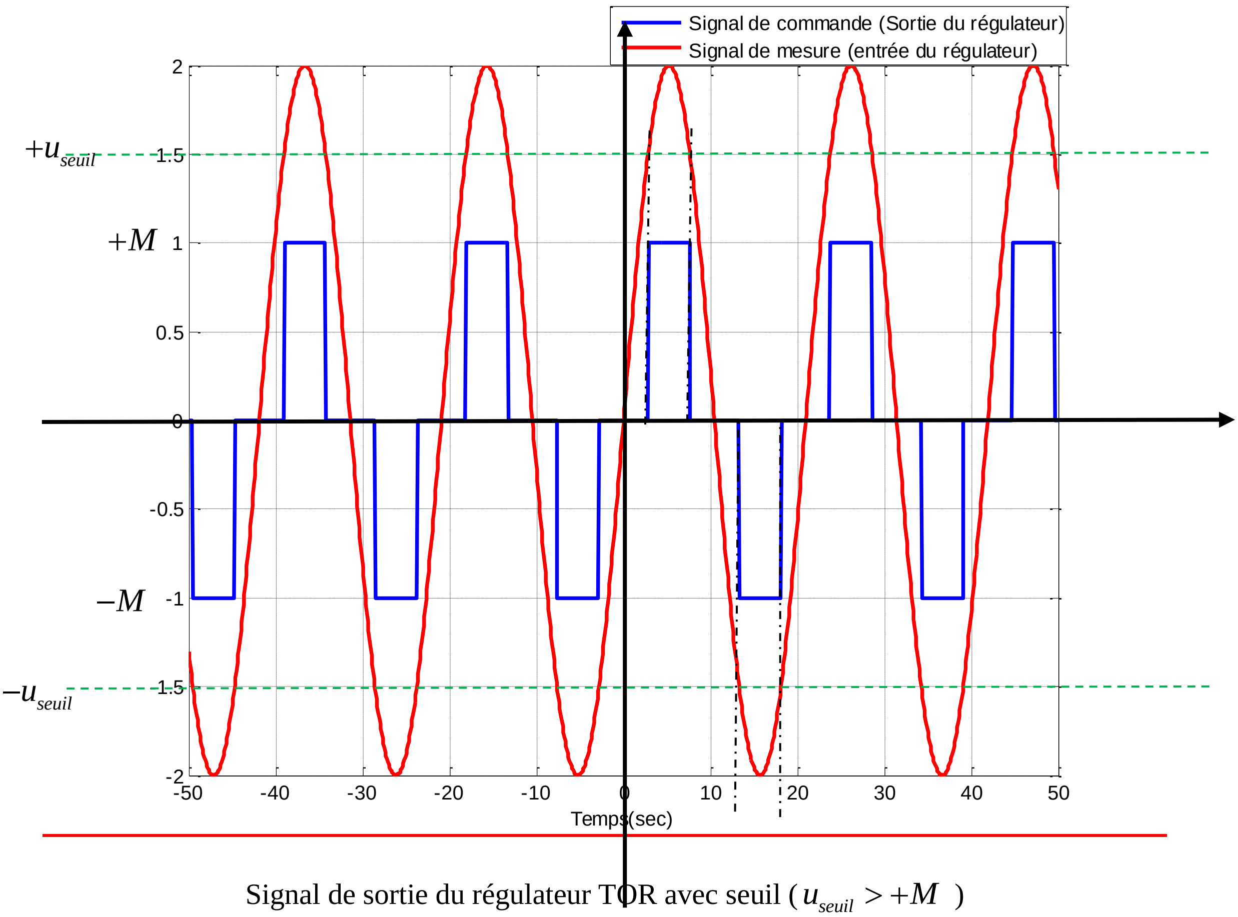
$$y(t)=\begin{cases}-M & si \;\; u(t)<-u_{seuil}\\ 0 & si \;\; -u_{seuil}\le u(t)\le u_{seuil}\\ +M & si \;\; u(t)>+u_{seuil}\end{cases}$$

$$y(t)=\begin{cases}0 & si \;\; -u_{seuil}\le u(t)\le u_{seuil}\\ +M & ailleurs\end{cases}$$

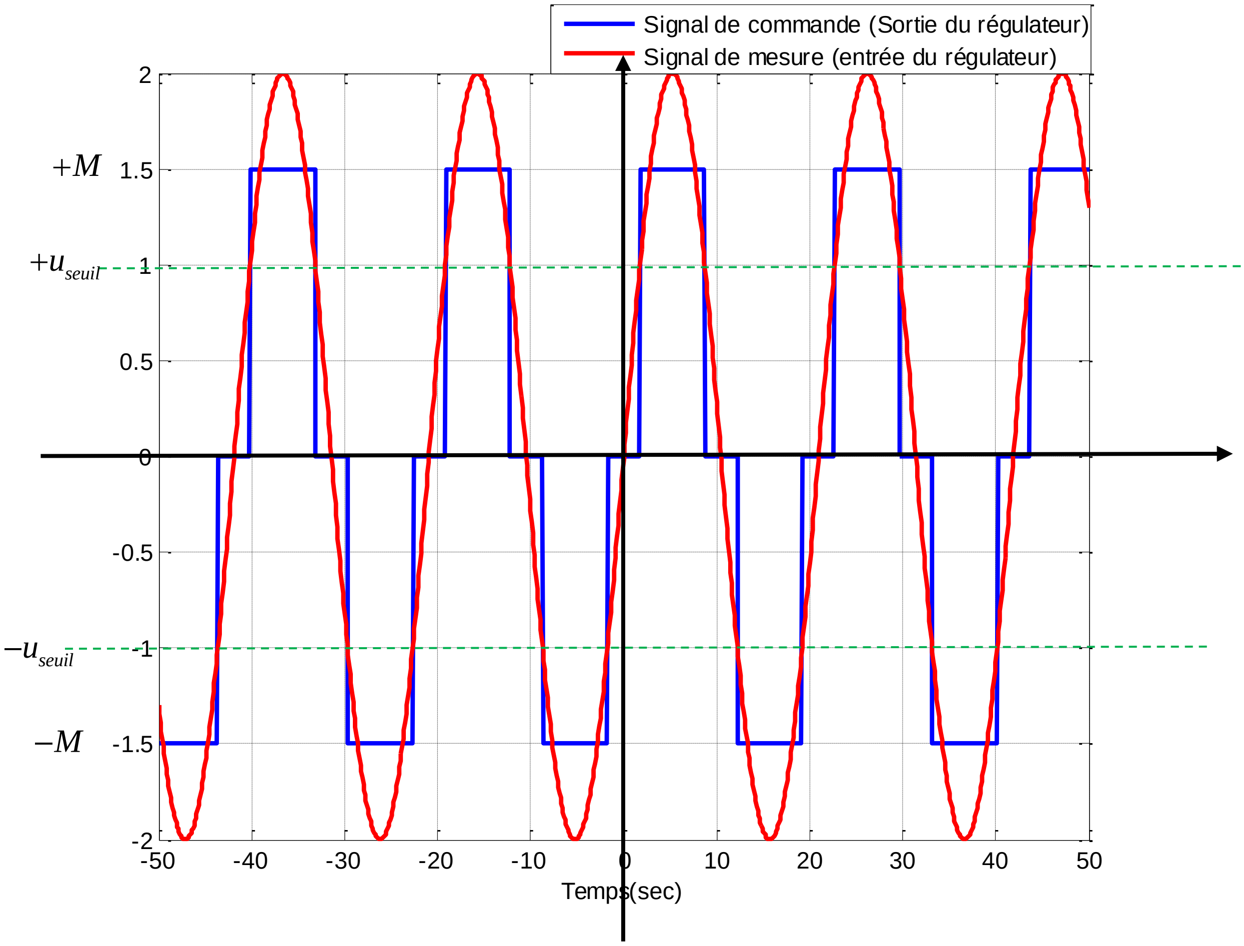
Principe de fonctionnement :

On applique à l'entrée du régulateur une excitation sinusoïdale $u(t)=A\sin(wt)$.

- Tant que la valeur de la mesure $u(t)$ est inférieure à $-u_{seuil}$ ($u(t)\le -u_{seuil}$) , la commande $y(t)$ (signal de sortie du régulateur) est de $-M$ (Rien).
- Dès que la mesure $u(t)$ atteint et dépasse $-u_{seuil}$, la commande $y(t)$ s'annule
- La commutation $0\rightarrow +M$ se produit pour $u(t)\ge +u_{seuil}$



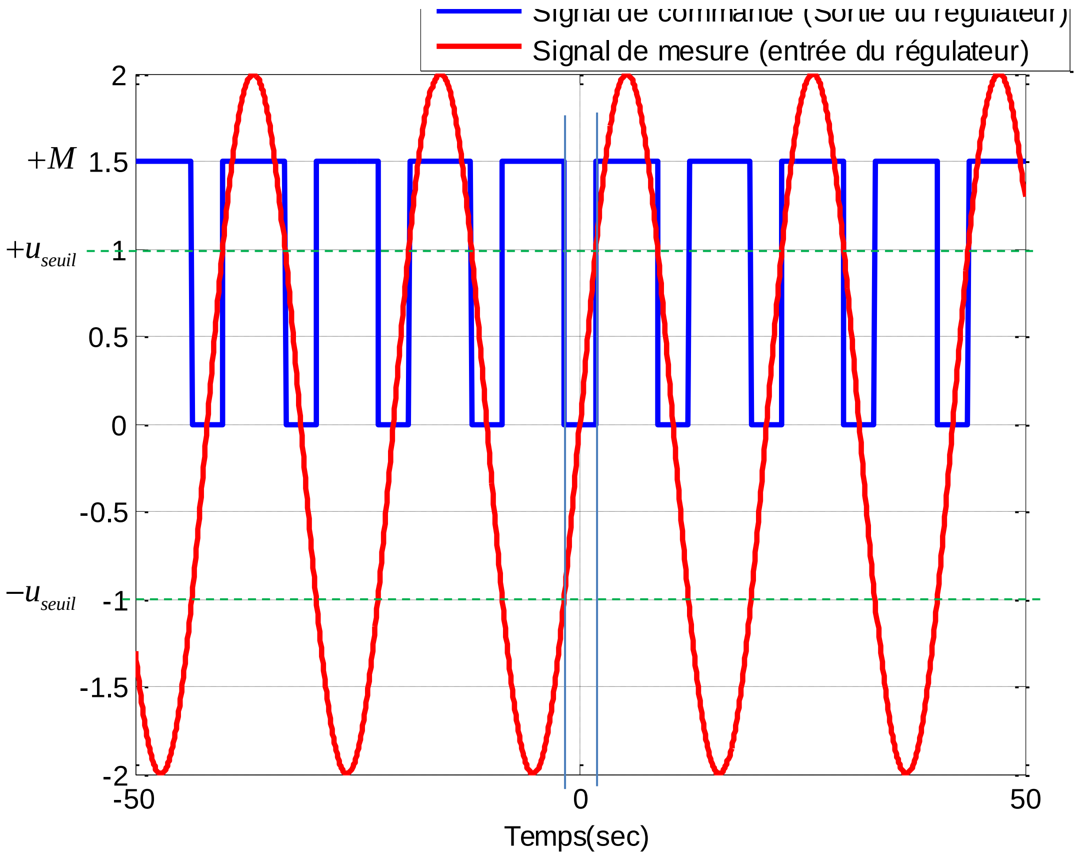
Signal de sortie du régulateur TOR avec seuil ($u_{seuil}>+M$)



Signal de sortie du régulateur TOR avec seuil ($u_{seuil} < +M$)

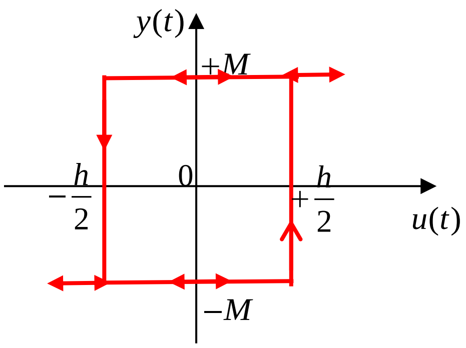
On applique à l'entrée du régulateur une excitation sinusoïdale $u(t) = A\sin(wt)$.

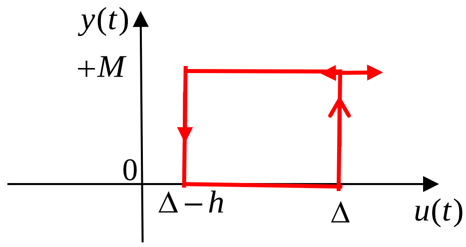
- Tant que la valeur de la mesure $u(t)$ est inférieure à $-e_{seuil}$ ($u(t) \leq -u_{seuil}$) , la commande $y(t)$ (signal de sortie du régulateur) est de $+M$ (Rien).
- Dès que la mesure $u(t)$ atteint et dépasse $-u_{seuil}$, la commande $y(t)$ s'annule
- La commutation se produit pour $u(t) \geq +u_{seuil}$



Signal de sortie du régulateur TOR avec seuil (b) ($u_{seuil} < +M$)

3. Régulateur tout-ou-rien avec hystérésis





(a) : Régulateur TOR avec hystérésis (b) : Régulateur TOR avec hystérésis

Systèmes à hystérésis :

L'hystérésis est le phénomène qui caractérise les systèmes qui possèdent deux caractéristiques distinctes en fonction du sens de variation du signal d'entrée :

- Lorsque le signal croît, le point de fonctionnement du système se déplace sur une de ces courbes. Lorsqu'il décroît, il se déplace sur l'autre.
- Dans les organes mécaniques, la présence de jeu dans certaines pièces, est susceptible de générer des fonctionnements avec hystérésis

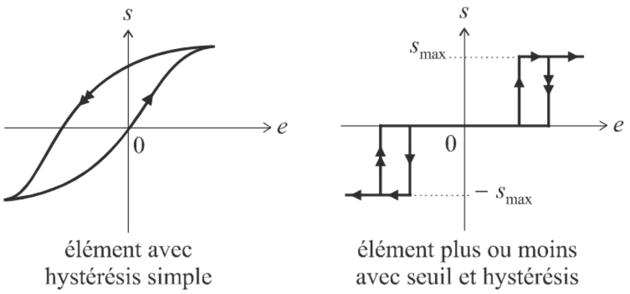


Figure 9.7 Caractéristiques d'organes avec hystérésis.

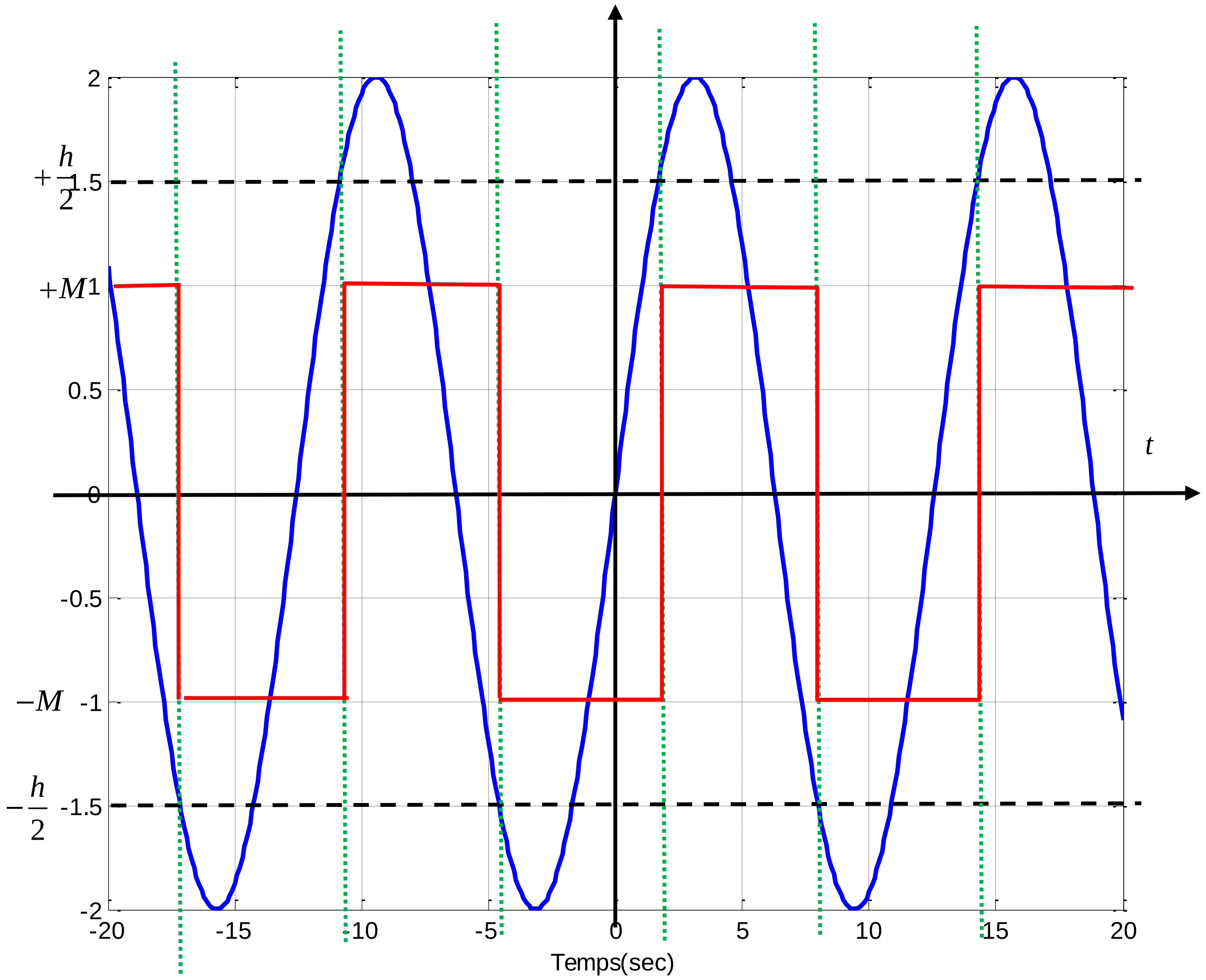
Caractéristiques d'organes avec hystérésis

Principe de fonctionnement Figure (a):

On applique à l'entrée du régulateur une excitation sinusoïdale $u(t) = A\sin(wt)$.

On suppose que l'on part avec $y(t) = -M$.

- Tant que la valeur de la mesure $u(t)$ est inférieure à $\frac{h}{2}$ $(u(t) < \frac{h}{2})$, la commande $y(t)$ (signal de sortie du régulateur) est ne change pas.
- La commutation $-M \rightarrow +M$ se produit pour $u(t) = +\frac{h}{2}$
- Ensuite, tant que $u(t) > -\frac{h}{2}$, la sortie du régulateur reste à $+M$
- La commutation $M \rightarrow -M$ se produit à $u(t) = -\frac{h}{2}$
- Le régulateur reste dans cette position tant que l'entrée n'atteint pas $+\frac{h}{2}$



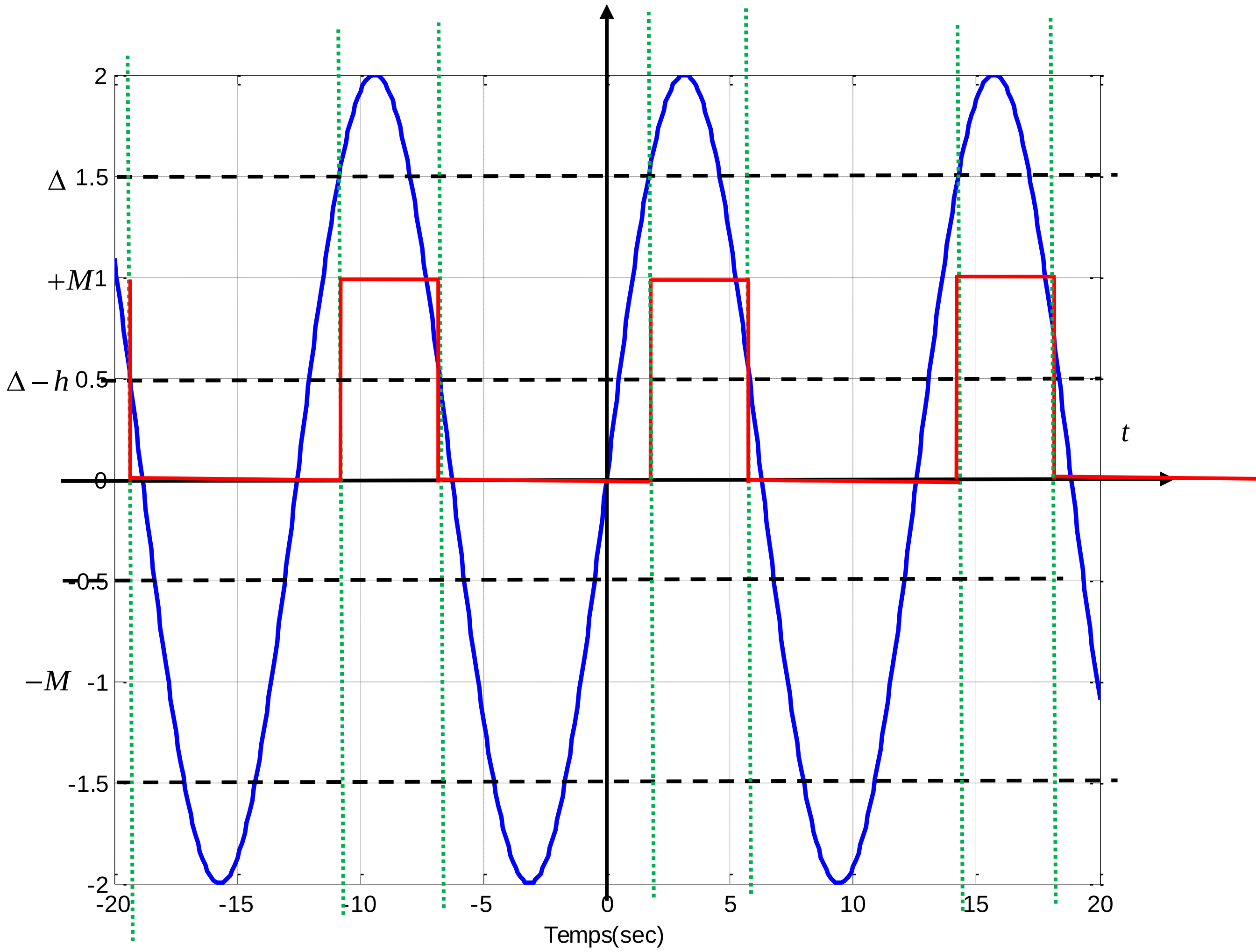
Signal de sortie du régulateur TOR avec hystérésis Fig (a)

Principe de fonctionnement Figure (b):

On applique à l'entrée du régulateur une excitation sinusoïdale $u(t) = A\sin(wt)$.

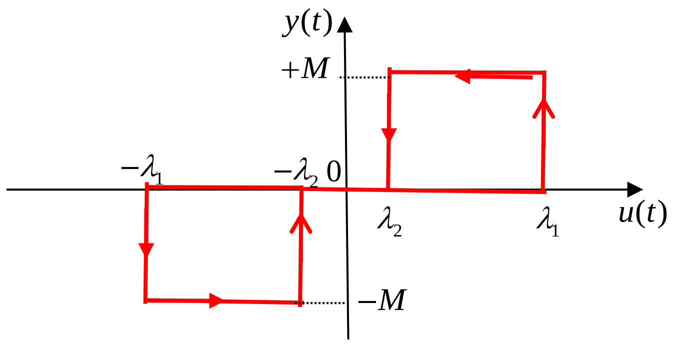
On suppose que l'on part avec $y(t) = 0$.

- Tant que la valeur de la mesure $u(t)$ est inférieure à Δ $(u(t) < \Delta)$, la commande $y(t)$ (signal de sortie du régulateur) est ne change pas c'est-à-dire $y(t) = 0$.
- La commutation $0 \rightarrow +M$ se produit pour $u(t) = \Delta$
- Ensuite, tant que $u(t) > \Delta - h$, la sortie du régulateur reste à $+M$
- La commutation $M \rightarrow 0$ se produit à $u(t) = \Delta - h$
- Le régulateur reste dans cette position tant que l'entrée n'atteint pas Δ n'atteint pas Δ



Signal de sortie du régulateur TOR avec hystérésis Fig (b)

4- Régulateur tout-ou-rien avec seuil et hystérésis



$$\lambda_1 = \frac{\Delta}{2} + \frac{h}{2}$$

$$\lambda_2 = \frac{\Delta}{2} - \frac{h}{2}$$

Principe de fonctionnement :

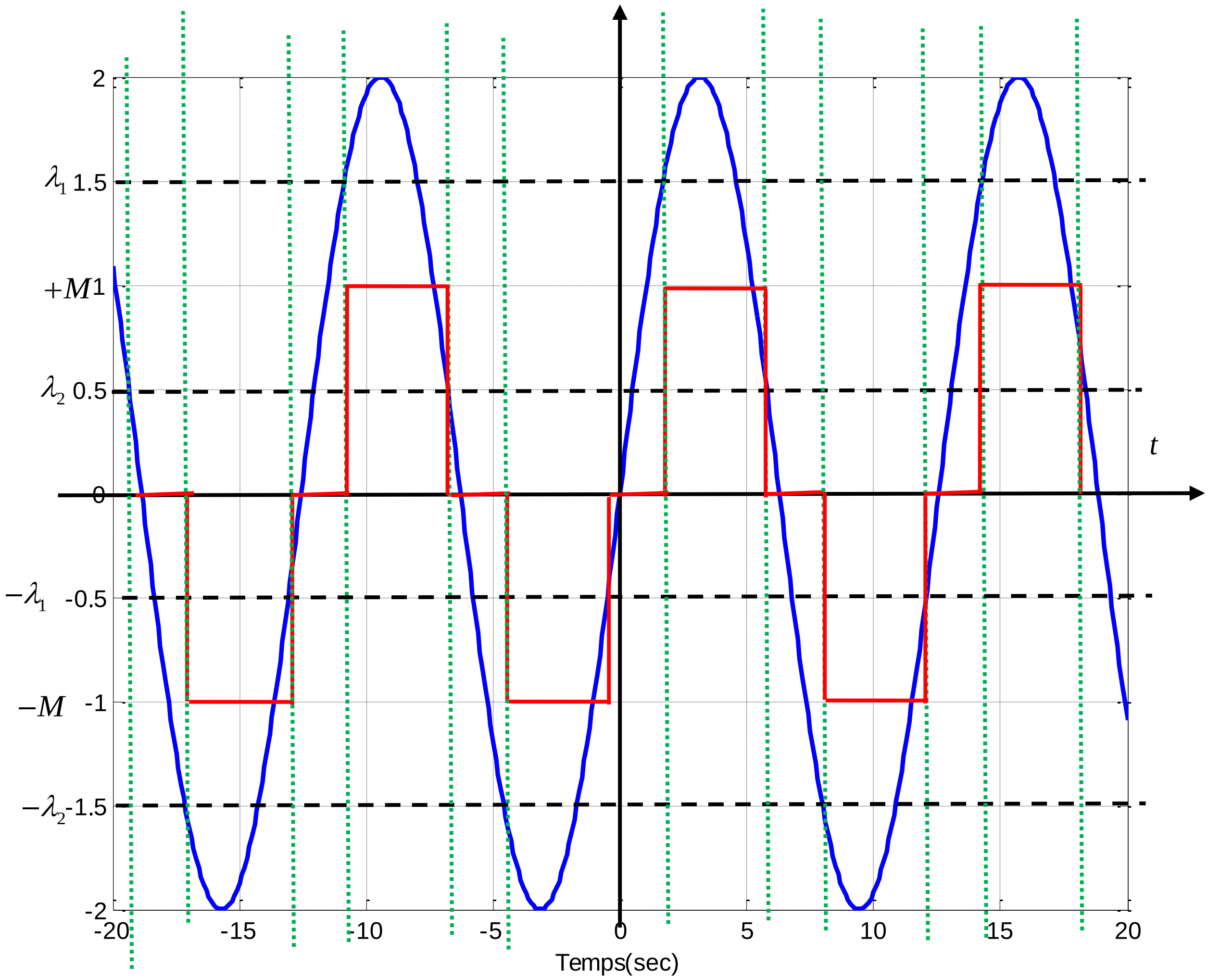
On applique à l'entrée du régulateur une excitation sinusoïdale $u(t) = A\sin(wt)$.

On suppose que l'on part avec $(u, y) = (-\lambda_1, 0)$.

- La commutation $0 \rightarrow -M$ se produit pour $u(t) = -\lambda_1$

- Ensuite, tant que $u(t) < -\lambda_2$, la sortie du régulateur reste à $-M$
- La commutation $-M \to 0$ se produit à $u(t) = -\lambda_2$
- Le régulateur reste dans cette position tant que l'entrée n'atteint pas λ_1.

  Tant que $u(t) > \lambda_2$, la sortie du régulateur reste à $+M$
- La commutation $+M \to 0$ se produit à $u(t) = \lambda_2$
- Le régulateur reste dans cette position tant que l'entrée n'atteint pas $-\lambda_1$.
- etc



Signal de sortie du régulateur TOR avec seuil et hystérésis

Chapitre 3

Les régulateurs standards : P, PI, PD et PID

Introduction

- Le régulateur standard le plus utilisé dans l'industrie est le régulateur PID (proportionnel intégral dérivé), car il permet de régler à l'aide de ses trois paramètres les performances (amortissement, temps de réponse, temps de montée …) d'une régulation d'un processus modélisé par un deuxième ordre.
- Le régulateur PID est bien adapté à la plupart des processus de type industriel. Et est relativement robuste par rapport aux variations des paramètres du procédé.
- Le régulateur PID cherche à minimiser l'erreur entre la consigne et la mesure, même en présence des perturbations

- Il est robuste par rapport aux variations des paramètres de procédé
- Il minimise rapidement les perturbations
- Il s'adapte rapidement aux nouvelles consignes

- La réalisation d'une boucle de régulation par PID est un problème très important, car il influence :

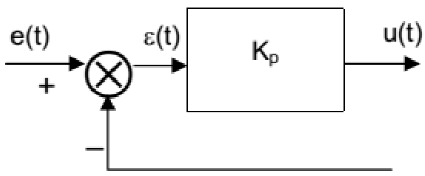
- La qualité de la régulation sur un site industriel
- Le temps de mise en œuvre de la commande

Le PID comporte deux aspects essentiels :

- le réglage du régulateur PID, pour lequel la connaissance d'un modèle dynamique du procédé d'une part et les performances désirées d'autre part déterminent le choix de la méthode de synthèse.
- l'implantation du régulateur dans une version analogique ou numérique et dans une configuration série, parallèle ou mixte.

Pour maîtriser rapidement ce correcteur PID, considérons, séparément, chacune des actions P, I, PI, D, PD.

1. Régulateur à action proportionnelle (P)



La loi proportionnelle : $u(t) = Kp\varepsilon(t)$ avec Kp est le gain proportionnel

La fonction de transfert : $G(p) = \dfrac{U(p)}{\varepsilon(p)} = Kp$,

Réponse indicielle du régulateur P (idéal)

1.1. Effet du régulateur P :

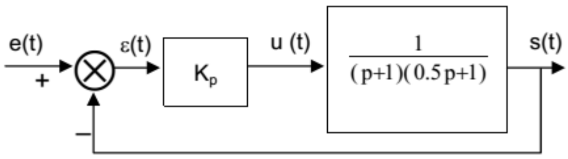
Le régulateur à action proportionnelle, ou régulateur P, a une action simple et naturelle, puisqu'il construit une commande u(t) proportionnelle à l'erreur $\varepsilon(p)$. Sa commande ne dépend pas du passé, ni d'une tendance, mais simplement de ce qui passe à l'instant présent.

- L'action Proportionnelle corrige de manière instantanée, donc rapide, tout écart de la grandeur à régler. Il permet donc d'améliorer notablement la précision *(Il Accélère la réponse de la mesure)*
- L'effet d'une augmentation du gain entraîne une diminution de l'erreur statique, rend le système plus rapide mais augmente l'instabilité du système *(Afin de diminuer l'écart de réglage et rendre le système plus rapide, on augmente le gain mais, on est limité par la stabilité du système).*
- Il permet le réglage du gain et de phase
- Augmente la bande passante du système, ce qui
- Améliore la rapidité du système et augmente l'instabilité du système

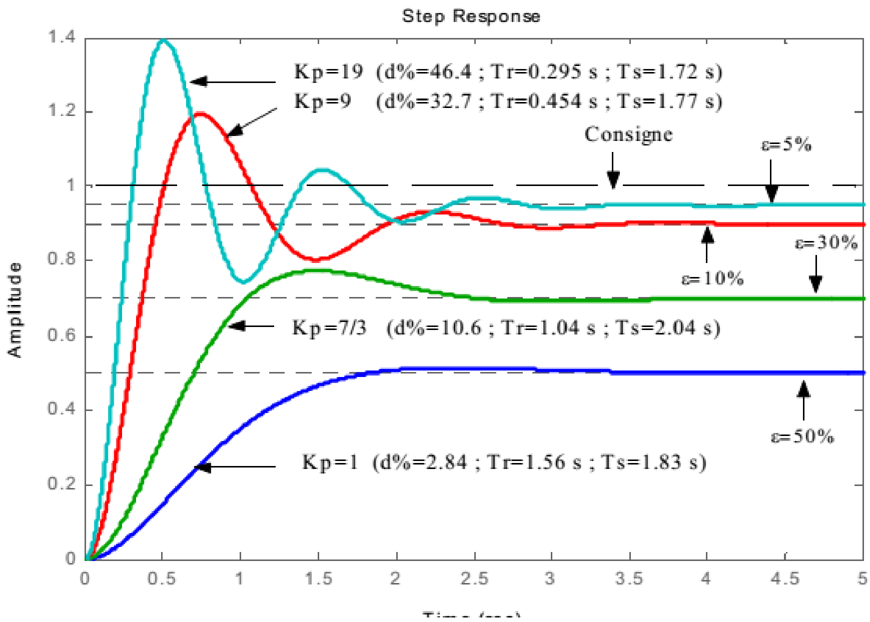
Remarque : Le correcteur proportionnel P n'est généralement pas utilisé seul. On verra que tout correcteur possède au moins l'action proportionnelle.

Exemple :

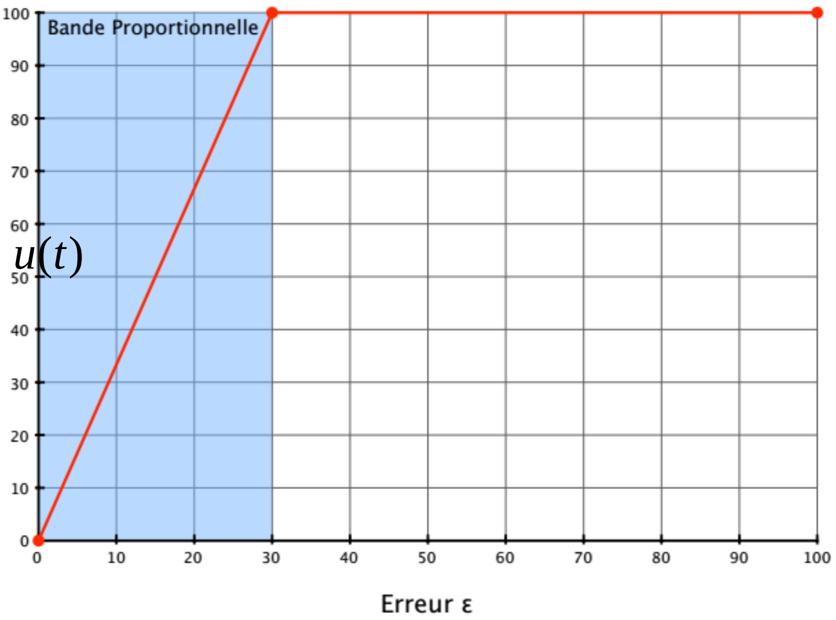
La figure suivante montre le schéma fonctionnel d'un exemple de régulation Proportionnelle.



Pour différentes valeurs de Kp on trouve les réponses :



1.2. La bande proportionnelle Bp :



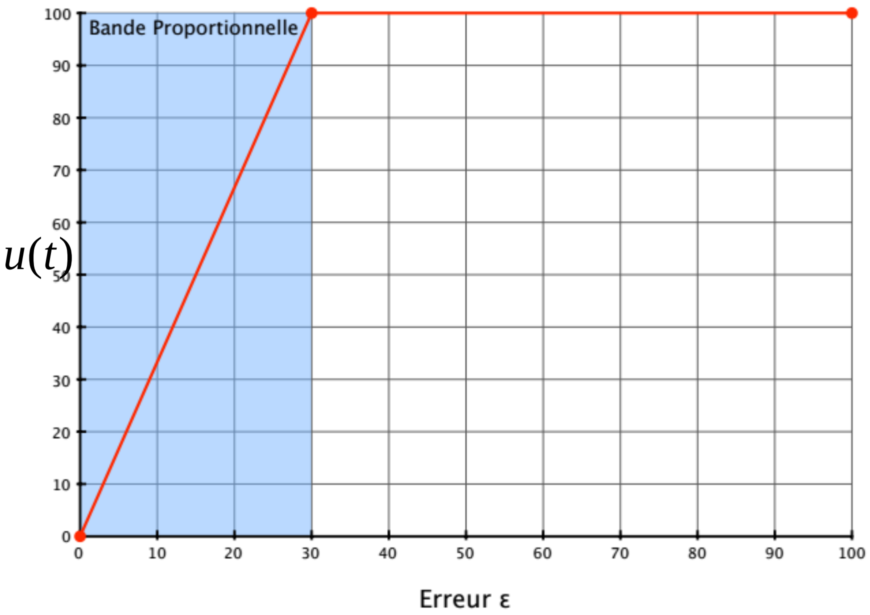
L'action proportionnelle s'exprime soit par le gain proportionnel Kp, soit par la bande proportionnelle BP. Cette dernière est définie comme la variation, en pourcentage, de l'entrée du régulateur $\varepsilon(t)$ nécessaire pour que la sortie $u(t)$ varie de 100 %.

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

La bande proportionnelle Bp est la partie où la commande est proportionnelle à l'erreur. Elle définit par :

$$Bp = \frac{100}{K_p}$$

- Plus la bande proportionnelle est petite, plus l'erreur en régime permanent est petite.
- Si la bande proportionnelle se rapproche trop de 0, le système devient instable

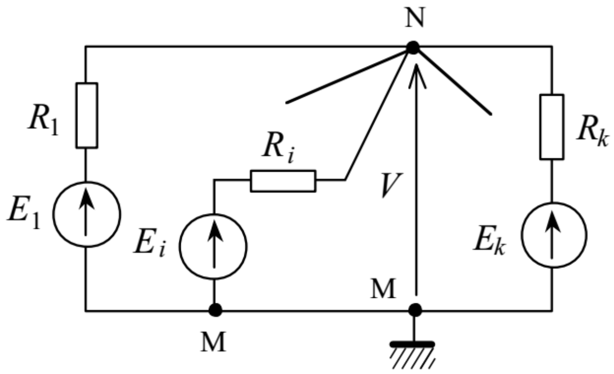


1.3. Régulateur P électronique :

Rappel théorème de Millman

Ce théorème donne une généralisation du théorème de superposition. Cette autre façon d'écrire la loi des nœuds permet de calculer la différence de potentiel entre un nœud N et le nœud de référence des potentiels.

Soit M un nœud du circuit choisi comme référence de potentiel VM = 0. Supposons n branches connectées à un nœud N. Chaque branche constitue un dipôle vu entre le nœud N et celui de référence, ce qui permet de remplacer la branche réelle par son modèle équivalent de Thévenin.



Si nous effectuons un court-circuit entre le nœud N et le nœud de référence, le courant de court-circuit (courant de Norton) est égal à la somme des courants fourni par chaque source.

$$I_N = I_{CC} = \sum_{i=1}^{n} \frac{E_i}{R_i} = \frac{E_1}{R_1} + \frac{E_2}{R_2} + \frac{E_3}{R_3} + \cdots + \frac{E_n}{R_n}$$

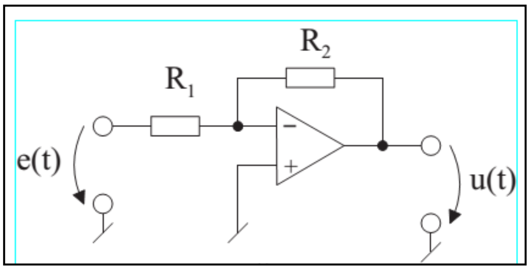
Lorsque nous passivons les sources de tension, toutes les résistances se trouvent en parallèle ; la conductance équivalente est égale à la somme des conductances de chaque source.

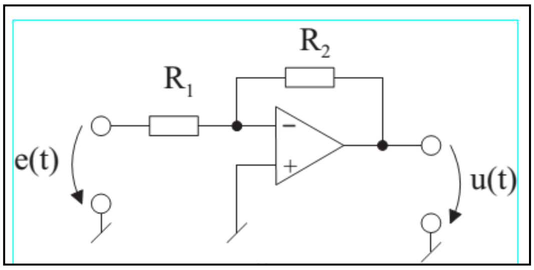
Le théorème de Millman stipule que la tension mesurée au nœud N est donc égale au produit de la résistance équivalente par la valeur de la source de courant, soit :

$$V_N = \frac{\sum_{i=1}^{n} E_i G_i}{\sum_{i=1}^{n} G_i} = \frac{E_1 G_1 + E_2 G_2 + E_3 G_3 + \cdots + E_n G_n}{G_1 + G_2 + G_3 + \cdots + G_n}$$

$$V_N = \frac{\dfrac{E_1}{R_1} + \dfrac{E_2}{R_2} + \dfrac{E_3}{R_3} + \cdots + \dfrac{E_n}{R_n}}{\dfrac{1}{R_1} + \dfrac{1}{R_2} + \dfrac{1}{R_3} + \cdots + \dfrac{1}{R_n}}$$

1.4. Régulateur P électronique :





(a) Montage amplificateur inverseur (b) : Montage amplificateur non inverseur

$$V^- = V^+ = 0$$

$$V^- = \frac{R_1}{R_1+R_2}u(t) + \frac{R_2}{R_1+R_2}e(t) = 0$$

$$\Rightarrow R_1 u(t) = -R_2 e(t)$$

$$\Rightarrow R_1 u(p) = -R_2 e(p), \quad H(p) = \frac{u(p)}{e(p)} = -\frac{R_2}{R_1} = Kp$$

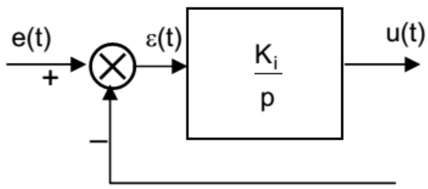
$$V^- = V^+ = e(t)$$

$$V^- = \frac{R_1}{R_1+R_2}u(t) = e(t)$$

$$\Rightarrow \frac{R_1}{R_1+R_2}u(p) = e(p)$$

$$H(p) = \frac{u(p)}{e(p)} = 1 + \frac{R_2}{R_1} = Kp$$

2. Régulateur à action intégrale (I)



La loi intégrale : $u(t) = K_i \int_0^t \varepsilon(t)dt = \frac{1}{T_i}\int_0^t \varepsilon(t)dt$

La fonction de transfert : $G(p) = \frac{U(p)}{\varepsilon(p)} = \frac{1}{T_i p} = \frac{K_i}{p}$

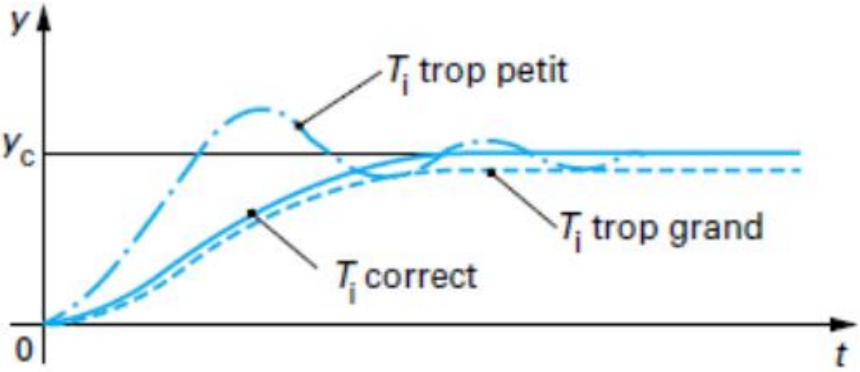
T_i : constante de temps d'intégration : K_i : le gain intégral

2.1. Effet de l'action I :

Afin de rendre le système plus dynamique, on diminuer T_i mais ceci provoque une augmentation du déphasage ce qui provoque l'instabilité en BF.

- L'action intégrale est utilisée lorsqu'on désire avoir en régime permanant une précision parfaite, il permet
- d'améliorer la précision en réduisant ou annulant l'erreur statique
- d'accélère la réponse du système
- Plus l'action intégrale est élevée (T_i petit), plus la réponse s'accélère et plus la stabilité se dégrade (provoque des oscillations et du fort dépassement).

Remarque : Le correcteur à action Intégrale pure n'est pratiquement jamais utilisé, en raison son effet déstabilisant. Il est, en général, associé au correcteur Proportionnel.



2.2. Régulateur I électronique :

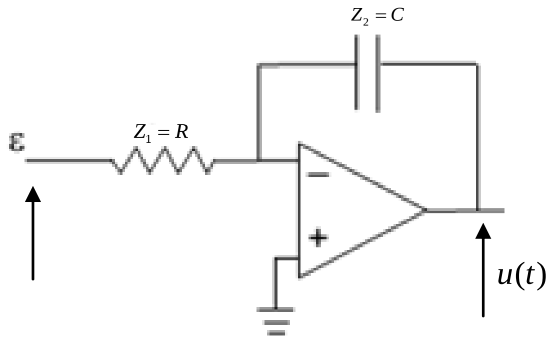
$$V^- = V^+ = 0$$

$$V^- = \frac{Z_1}{Z_1 + Z_2} u(t) + \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} \varepsilon(t) = 0$$

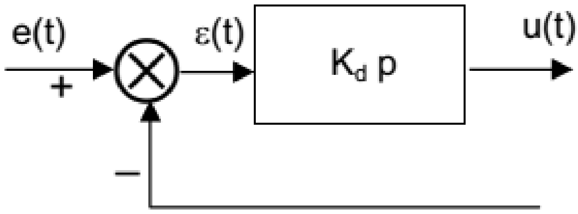
$$\Rightarrow Z_1 u(t) = -Z_2 \varepsilon(t)$$

$$\Rightarrow Z_1 u(p) = -Z_2 \varepsilon(t), \quad H(p) = \frac{u(p)}{\varepsilon(t)} = -\frac{Z_2}{Z_1} = \frac{-\frac{1}{Cp}}{R}$$

$$H(p) = \frac{u(p)}{\varepsilon(t)} = -\frac{1}{RCp}, \quad T_i = -\frac{1}{RC}$$



3. Régulateur à action dérivée (D)



La loi dérivée : $$u(t) = K_d \frac{d\varepsilon(t)}{dt} = T_d \frac{d\varepsilon(t)}{dt}$$

T_d *: constante de temps de dérivation* K_d *: le gain dérivé*

La fonction de transfert : $$G(p) = \frac{U(p)}{\varepsilon(p)} = T_d p$$

3.1. Effet de l'action dérivée

Dans ce cas, la sortie du dérivateur est proportionnelle à la vitesse de variation de l'écart

Effet statique : L'action du régulateur D n'intervient que sur la dérivée de l'erreur, c'est-à-dire qu'elle est sensible à la variation de l'erreur et non à l'erreur elle-même. Lorsque celle-ci est constante (régime statique) le dérivateur n'a aucun effet. En d'autres termes, *le régulateur D ne peut rien faire face à erreur constante.*

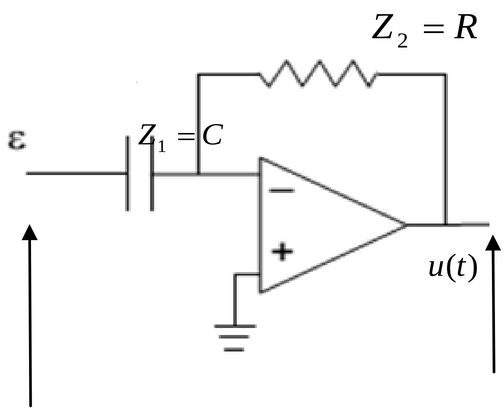
Effet dynamique : l'intérêt principal de la correction dérivée est sa sensibilité aux variations de l'erreur. Elle s'oppose aux grandes variations de l'erreur. Il permet ;

- d'améliore la stabilité du système
- d'accélérer la réponse transitoire du système grâce à l'effet d'anticipation (Si l'action dérivée augmente (Td grand), la réponse s'accélère. Compromis vitesse stabilité)
- de compenser les effets du temps mort (retard) du procédé.
- mais fait diminuer la précision du système, et amplifie les bruits de hautes fréquences

Remarque : le régulateur à action dérivée n'est pas recommandé pour le réglage d'une variable bruitée, en dérivant un bruit, son amplitude risque devenir plus importante que celle du signal utile

- il ne peut pas être utilisé seule

3.2. Régulateur D électronique :



$$V^- = V^+ = 0$$

$$V^- = \frac{Z_1}{Z_1+Z_2}u(t) + \frac{Z_2}{Z_1+Z_2}\varepsilon(t) = 0$$

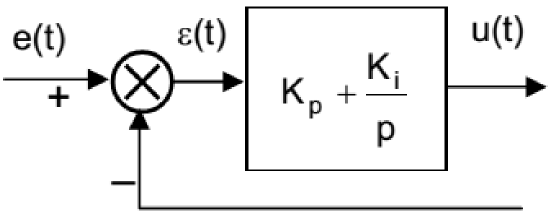
$$\Rightarrow Z_1 u(t) = -Z_2 \varepsilon(t)$$

$$\Rightarrow Z_1 u(p) = -Z_2 \varepsilon(p), \quad H(p) = \frac{u(p)}{\varepsilon(p)} = -\frac{Z_2}{Z_1} = -\frac{R}{\frac{1}{Cp}}$$

$$G(p) = \frac{U(p)}{\varepsilon(p)} = -RCp, \quad T_d = -RC$$

4. Régulateur à action Proportionnelle-Intégrale (PI)

Le régulateur PI est le régulateur le plus utilisé en pratique où ses contributions à la précision mais aussi à la robustesse du système asservi sont particulièrement appréciées.



Loi de commande du régulateur PI :

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

Fonction de transfert

$$\boxed{G(p) = \frac{U(p)}{\varepsilon(p)} = K_p + \frac{K_i}{p} = K_p + \frac{1}{T_i p}}$$

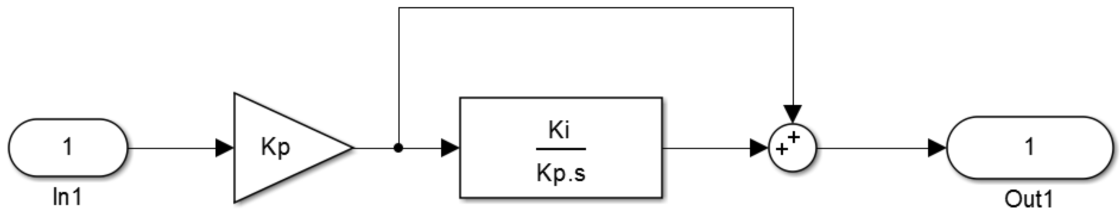
$$\boxed{G(p) = \frac{U(p)}{\varepsilon(p)} = \frac{K_p}{p}\left(p + \frac{K_i}{K_p}\right)}$$

$$\boxed{G(p) = \frac{U(p)}{\varepsilon(p)} = K_p\left(1 + \frac{K_i}{K_p p}\right) = K_p\left(1 + \frac{1}{T_n p}\right)}$$

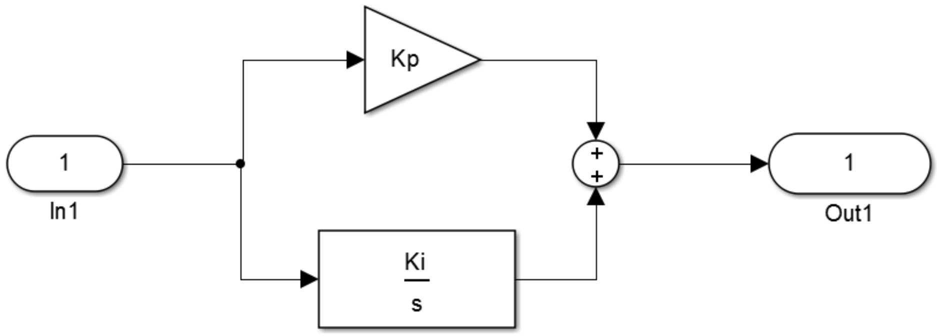
K_p *: le gain proportionnel ;* K_i *:le gain intégral ;* $T_i = \dfrac{1}{K_i}$ *: constante de temps intégration*

$T_n = \dfrac{K_p}{K_i} = K_p T_i$ *: dosage de corrélation d'intégrale*

Schéma fonctionnel du régulateur PI :



Structure en série



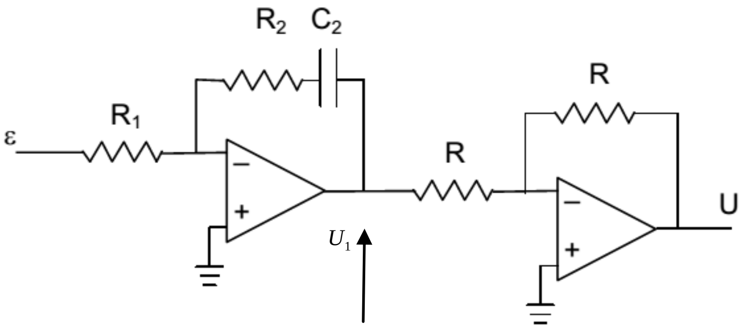
Structure en parallèle

4.2. Effet du régulateur PI

Le régulateur PI assure une transmission instantanée du signal d'erreur ε(t), suivi d'une intégration de ce signal.

- Ce correcteur sera utilisé chaque fois qu'une erreur permanente doit être annulée ou minimisée, c'est à dire une amélioration de la précision du système.
- En effet, il introduit une augmentation du gain global du système aux basses fréquences
- Kp et Ki sont tous deux réglables. Ki ajuste l'action intégrale, tandis que Kp affecte à la fois les actions intégrale et proportionnelle.

4.3. Régulateur PI électronique :



$$\acute{e}tage\ 1:\ V^- = V^+ = 0$$

$$V^- = \frac{Z_1}{Z_1+Z_2}U_1 + \frac{Z_2}{Z_1+Z_2}\varepsilon(t) = 0 \Rightarrow Z_1U_1 = -Z_2\varepsilon(t)$$

$$\Rightarrow Z_1U_1(p) = -Z_2\varepsilon(p),\ \ U_1(p) = -\frac{Z_2}{Z_1}\varepsilon(p) = -\frac{R_2 + \frac{1}{Cp}}{R_1}\varepsilon(p) = \left(-\frac{R_2}{R_1} - \frac{1}{R_1Cp}\right)\varepsilon(p)$$

$$\acute{e}tage\ 2:\ \ V^- = V^+ = 0$$

$$V^- = \frac{R}{2R}U_1 + \frac{R}{2R}U = 0 \Rightarrow U_1 = -U$$

$$\Rightarrow U_1(p) = \left(\frac{R_2}{R_1} + \frac{1}{R_1Cp}\right)\varepsilon(p)\ = \frac{R_2}{R_1}\left(1 + \frac{\frac{R_1}{R_2}}{R_1Cp}\right)\varepsilon(p) = \frac{R_2}{R_1}\left(1 + \frac{1}{R_2Cp}\right)\varepsilon(p)$$

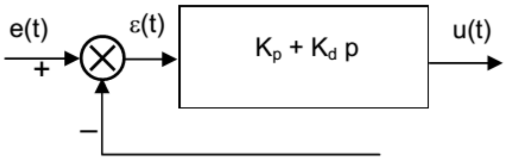
$$\Rightarrow U_1(p) = \frac{R_2}{R_1}\left(\frac{1+R_2Cp}{R_2Cp}\right)\varepsilon(p)\ \ avec\ \ K_p = \frac{R_2}{R_1}\ \ et\ \ K_p = \frac{1}{R_2C}$$

5. Régulateur à action Proportionnelle-Dérivée (PD)

On notera que l'action *D* ne permettant pas la transmission d'un signal constant, elle doit donc toujours s'accompagner au moins d'une action P en parallèle (régulateur PD).

- Ce type de régulateur est utilisé pour augmenter la marge de phase. Pour des fréquences élevées.

- La partie dérivée pose un problème majeur de stabilité. Il est donc judicieux d'ajouter un pôle afin de limiter l'effet dérivateur à des fréquences inférieures à la fréquence de pulsation Fp.



Loi de commande du régulateur PD :

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

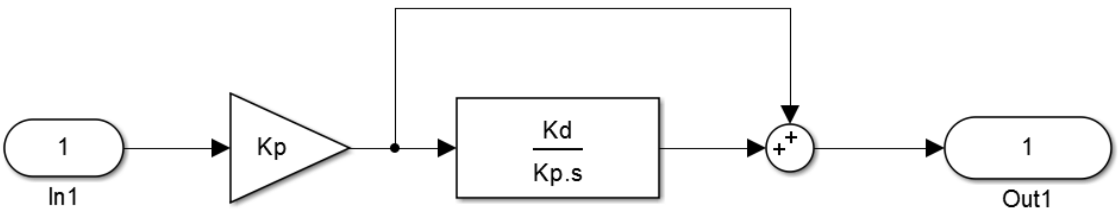
Fonction de transfert du régulateur PD :

$$\boxed{G(p) = \frac{U(p)}{\varepsilon(p)} = K_p + K_d\, p}$$

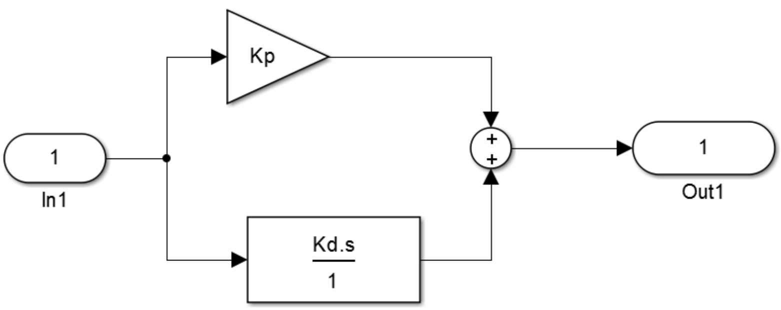
$$\boxed{G(p) = \frac{U(p)}{\varepsilon(p)} = K_p \left(1 + \frac{K_d}{K_p}\, p\right)} \quad \boxed{G(p) = \frac{U(p)}{\varepsilon(p)} = K_p \left(1 + T_d\, p\right)}$$

K_p : le gain proportionnel ; K_d :le gain dérivé ; $T_d = \frac{K_d}{K_p}$: constante de temps de dérivation

Schéma fonctionnel du régulateur PD :



Structure en série

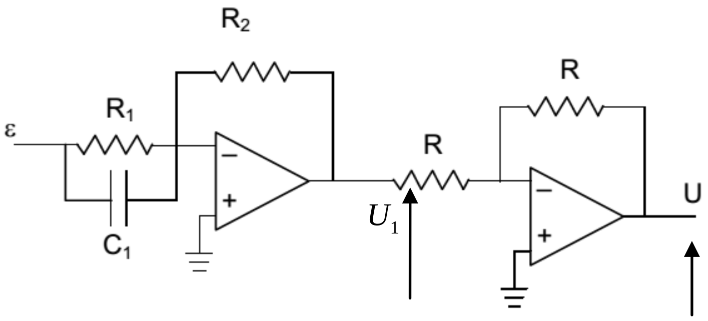


Structure en parallèle

5.1. Effet du régulateur PD

- Amélioration de l'amortissement et réduction du dépassement.
- Réduction du temps de montée et du temps d'établissement.
- Augmentation de la bande passante.
- Amélioration de la marge de phase et de la marge de gain.

5.2. Régulateur PD électronique :



$$\textit{étage } 1 : V^- = V^+ = 0$$

$$V^- = \frac{Z_1}{Z_1 + Z_2} U_1 + \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} \varepsilon(t) = 0 \Rightarrow Z_1 U_1 = -Z_2 \varepsilon(t)$$

$$\Rightarrow Z_1 U_1(p) = -Z_2 \varepsilon(p),\ \ U_1(p) = -\frac{Z_2}{Z_1}\varepsilon(p) = -\frac{R_2}{\dfrac{\frac{R_1}{Cp}}{R_1 + \frac{1}{Cp}}}\varepsilon(p) = -\frac{R_2}{R_1}\left(1 + R_1 Cp\right)\varepsilon(p)$$

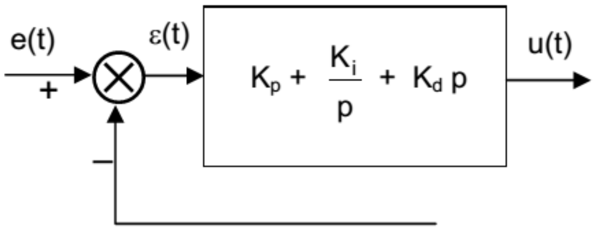
$$\textit{étage } 2 : V^- = V^+ = 0$$

$$V^- = \frac{R}{2R} U_1 + \frac{R}{2R} U = 0 \Rightarrow U_1 = -U$$

$$\Rightarrow U_1(p) = \frac{R_2}{R_1}\left(1 + R_1 Cp\right) e(p) \ \ avec\ \ K_p = \frac{R_2}{R_1} \ \ et\ \ K_d = R_2 C$$

6. Régulateur Proportionnel Intégrateur Dérivé (PID).

Un régulateur PID est un régulateur qui dispose des trois actions P, I et D. Son intérêt est de réunir les effets positifs des trois correcteurs de base. Grâce au terme I, il permet l'annulation d'une erreur statique tout en autorisant grâce à l'action D des performances de rapidité supérieures à celles d'un régulateur PI.



Loi de commande du régulateur PID standard (en parallèle)

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

Fonction de transfert du régulateur PID (en parallèle) :

$$\boxed{G(p) = \frac{U(p)}{\varepsilon(p)} = K_p + \frac{K_i}{p} + K_d p}$$

$$\boxed{G(p) = \frac{U(p)}{\varepsilon(p)} = K_p\left(1 + \frac{K_i}{K_p p} + \frac{K_d}{K_p}p\right) = K_p\left(1 + \frac{1}{T_i p} + T_d p\right)}$$

K_p : gain proportionnel ; K_i : gain intégrale ; K_d : gain dérivé

$T_i = \dfrac{K_p}{K_i}$: constante de temps d'intégration ; $T_d = \dfrac{K_d}{K_p}$: constante de temps de dérivation.

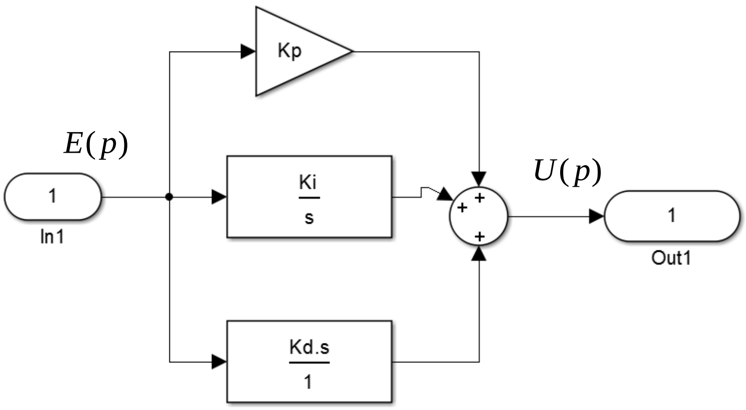
6.1. Effet du régulateur PID

Les effets de chaque correcteur (Kp, Ki et Kd) sur la réponse en boucle fermée du système sont regroupés sur le tableau suivant :

Augmentation de	Stabilité	Précision	Rapidité
Kp	diminue	augmente	augmente
Ti	augmente	pas d'influence	diminue
Td	diminue	pas d'influence	augmente

6.2. Réalisation du régulateur PID

❖ Structure parallèle



- La fonction de transfert

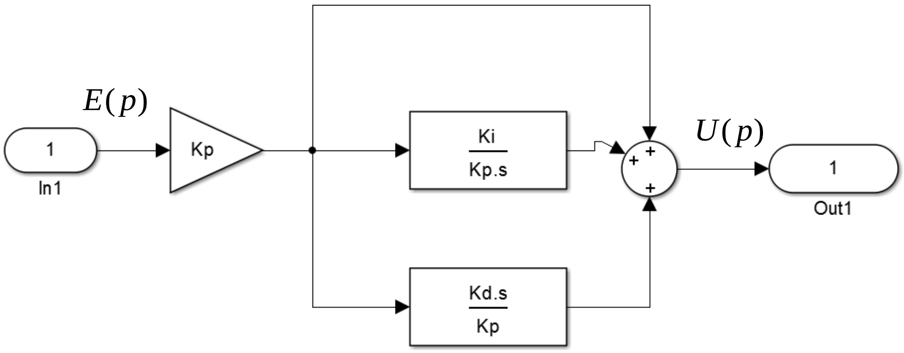
$$G(p)=\frac{U(p)}{E(p)}=K_p+\frac{K_i}{p}+K_d p$$

- La loi de commande

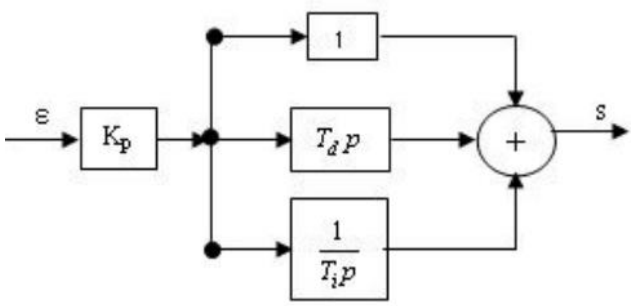
$$U(p)=K_pE(p)+\frac{K_i}{p}E(p)+K_dE(p)$$

$$\boxed{u(t)=K_pe(t)+K_i\int_0^t e(\tau)d\tau+K_d\frac{de(t)}{dt}}$$

❖ Structure mixte



ou



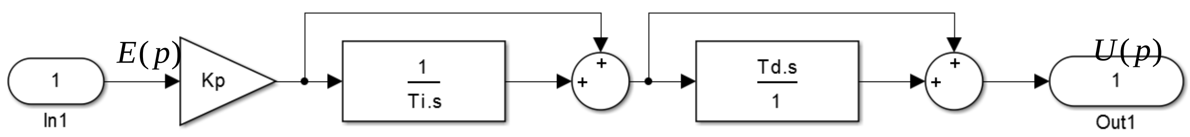
- La fonction de transfert

$$U(p) = K_p\left(1 + \frac{1}{T_i p} + T_d p\right)E(p)$$

- La loi de commande

$$\boxed{u(t) = K_p\left(e(t) + \frac{1}{T_i}\int_0^t e(t)dt + T_d\frac{de(t)}{dt}\right)}$$

❖ Structure série



- La fonction de transfert

$$U(p) = K_p\left(1 + \frac{1}{T_i p}\right)(1 + T_d p)E(p)$$

- La loi de commande

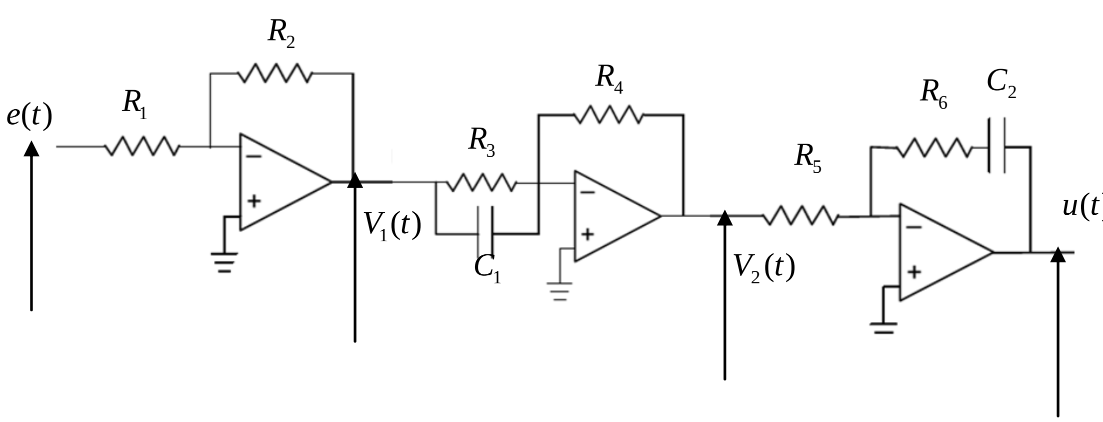
$$U(p) = K_p\left(1 + \frac{1}{T_i p}\right)(1 + T_d p)E(p) = K_p\left(1 + T_d p + \frac{1}{T_i p} + \frac{T_d}{T_i}\right)E(p)$$

$$= K_p\left(1 + \frac{T_d}{T_i}\right)E(p) + \frac{K_p}{T_i p}E(p) + K_p T_d pE(p)$$

$$\Rightarrow u(t) = K_p\left(\frac{T_i + T_d}{T_i}\right)e(t) + \frac{K_p}{T_i}\int_0^t e(t)dt + K_p T_d\frac{de(t)}{dt}$$

$$\boxed{u(t) = K_p\left(\frac{T_i + T_d}{T_i}\right)e(t) + K_i\int_0^t e(t)dt + K_p T_d\frac{de(t)}{dt}}$$

6.3. PID électronique



$$\text{étage } 1$$

$$V^- = V^+ = 0$$

$$V^- = \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_1 + \frac{R_2}{R_1 + R_2} e(t) = 0$$

$$\Rightarrow R_1 V_1 = -R_2 e(t)$$

$$\Rightarrow R_1 V_1(p) = -R_2 e(p), \quad V_1(p) = -\frac{R_2}{R_1} e(p) \Rightarrow V_1(p) = -G_1 e(p)$$

$$\text{étage } 2$$

$$V^- = V^+ = 0; \quad V^- = \frac{Z_1}{Z_1 + R_4} V_2 + \frac{R_4}{Z_1 + R_4} V_1 = 0$$

$$\Rightarrow Z_1 V_2 = -R_4 V_1 \quad avec \quad \frac{1}{Z_1} = \frac{1}{R_3} + C_1 p \Rightarrow Z_1 = \frac{R_3}{1 + R_3 C_1 p}$$

$$\Rightarrow V_2 = \frac{-R_4 V_1}{Z_1} = \frac{-R_4}{R_3} (1 + R_3 C_1 p) V_1$$

$$\Rightarrow V_2 = G_1 G_2 (T_d p + 1) e(p) \quad avec \quad G_2 = \frac{R_4}{R_3}, T_d = R_3 C_1$$

$$\text{étage } 3$$

$$V^- = V^+ = 0; \quad V^- = \frac{R_5}{R_5 + Z_2} U + \frac{Z_2}{R_5 + Z_2} V_2 = 0$$

$$\Rightarrow R_5 U = -Z_2 V_2 = 0 \quad avec \quad Z_2 = R_6 + \frac{1}{C_2 p}$$

$$\Rightarrow U = \frac{-Z_2}{R_5} V_2 = \frac{-1}{R_5} \left(R_6 + \frac{1}{C_2 p} \right) V_2 = -\frac{R_6}{R_5} \left(1 + \frac{1}{R_6 C_2 p} \right) V_2$$

$$\Rightarrow U = -G_3 \left(1 + \frac{1}{T_i p} \right) V_2 \quad avec \; G_2 = \frac{R_4}{R_3}$$

$$-G_2 (Tp + 1) G_1 e(p) \quad avec \quad G_2 = \frac{R_6}{R_5}, T_1 = R_6 C_2$$

$$U = -G_1 G_2 G_3 \left(1 + \frac{1}{T_i p} \right) (1 + T_d p) e(p)$$

$$\Rightarrow \frac{U(p)}{e(p)} = -G \left(1 + \frac{1}{T_i p} \right) (1 + T_d p)$$

6.4. Adaptation de la partie dérivée

L’action dérivée pure ne peut pas être implémentée car non réalisable physiquement. De plus, l’effet dérivateur appliqué à haute fréquences conduirait à une amplification trop importante des bruits de mesure. En approchant le terme $T_d p$ par la fonction de transfert suivante.

$$\frac{T_d p}{1+\frac{T_d p}{N}} = \frac{NT_d p}{N+T_d p} = \frac{N}{1+\frac{N}{T_d p}} \simeq N \text{ aux hautes fréquences}$$

Les bruits et les changements brusques de consigne seront alors amplifiés au plus de (par défaut $N=10$ *et* $N=3 \approx 20$)

La fonction de transfert est alors : $U(p)=k_p(1+\frac{1}{T_i p}+\frac{T_d p}{1+\frac{T_d p}{N}})E(p)$

Chapitre 4

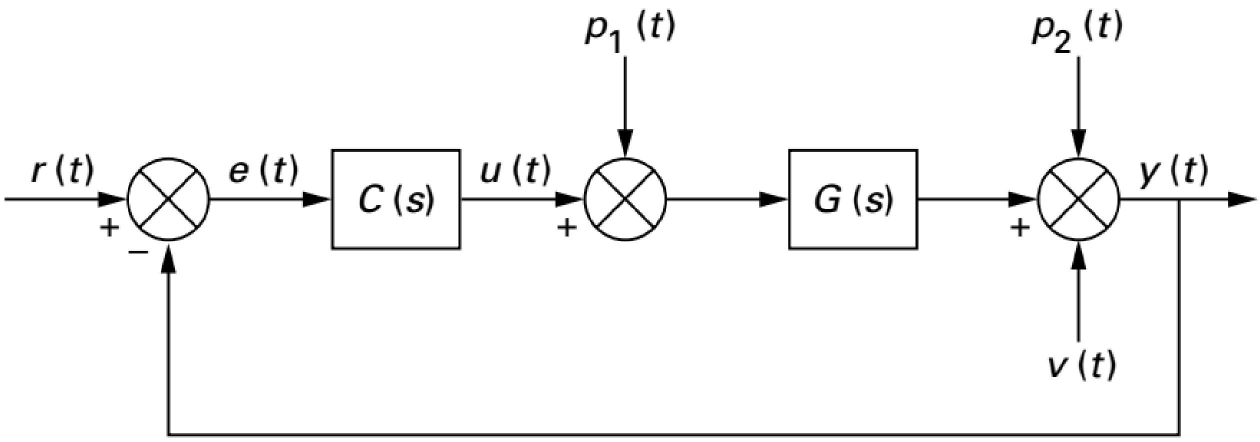
Dimensionnement des régulateurs

Introduction

Le but de ce chapitre est de s'initier au dimensionnement des paramètres du régulateur par quelques méthodes dites empiriques, c'est-à-dire par des méthodes basées sur des essais expérimentaux dont nous donnerons un aperçu sur la démarche à suivre pour la mise en œuvre.

On rappelle que ces méthodes (Méthodes de dimensionnement ou de synthèse des régulateurs) ne nécessitent pas la connaissance de la fonction de transfert du procédé, ce qui constitue l'un des points forts de ces méthodes.

Le but du dimensionnement est de calculer un régulateur – compte tenu du système à régler qui garantisse que le système asservi remplisse les conditions de fonctionnement requise par le cahier des charges.



avec $r(t)$: signal de référence ou consigne (entré par l'utilisateur ou un autre régulateur),

$e(t)$: erreur (entrée du régulateur). $e(t) = r(t) - y(t)$,

$u(t)$ commande (sortie du régulateur),

$p_1(t)$, $p_2(t)$: perturbation à l'entrée et à la sortie du procédé respectivement,

$v(t)$: bruit à la sortie du procédé (par exemple bruit de mesure),

$y(t)$: sortie mesurée du procédé (variable à commander),

$C(s)$: fonction de transfert du régulateur,

$G(s)$: fonction de transfert du procédé.

2. Méthodes de synthèse du régulateur PID

Si l'on connaît les paramètres du procédé, suite à une modélisation de sa fonction de transfert réglante, et si l'on est en possession de la structure du régulateur. Il est alors possible de calculer rapidement les paramètres de réglage (K_p, T_i *et* T_d dans le cas d'un régulateur PID) qu'on pourra affiner suite à des essais, afin d'obtenir la réponse souhaitée.

Lors de la synthèse d'un régulateur (détermination de ses paramètres Kp, Ti et Td) , il est important de considérer quelques critères typiques:

- Atténuation des perturbations de charge ;
- Poursuite du signal de référence ;
- Robustesse vis-à-vis des incertitudes de modélisation ;
- Atténuation du bruit de mesure.

Il existe différentes méthodes de réglage des actions d'un régulateur P.I.D. suivant le type de procédé et les contraintes de fabrication on choisira l'une des méthodes.

2.1. Réglage par approches successives

- Le procédé est d'abord conduit en manuel pour stabiliser la mesure au point de consigne (c'est-à-dire annuler l'erreur).
- De petites variations sur la vanne permettent d'observer les réactions naturelles du procédé, afin de dégrossir les actions à mettre sur le régulateur au début de chaque réglage.
- Les actions seront réglées dans l'ordre P, D, I.
- Les critères de performance retenus pour la régulation sont une réponse bien amortie (dépassement de 10 à 15 %) avec une rapidité maximum (temps d'établissement minimal).
- La majorité des boucles de régulation correspondent à des boucles fermées où l'on utilise un seul régulateur.
- Le mode de régulation souvent utilisé dans ces régulateurs, est le mode PID.
- En pratique le réglage par étape des actions proportionnelle, intégrale, dérivée, tout en observant l'évolution de la mesure, suite à des changements de consigne (tests en asservissement), ou suite à des variations de grandeurs perturbatrices (tests en régulation).

2.1.1. Réglage de l'action proportionnelle

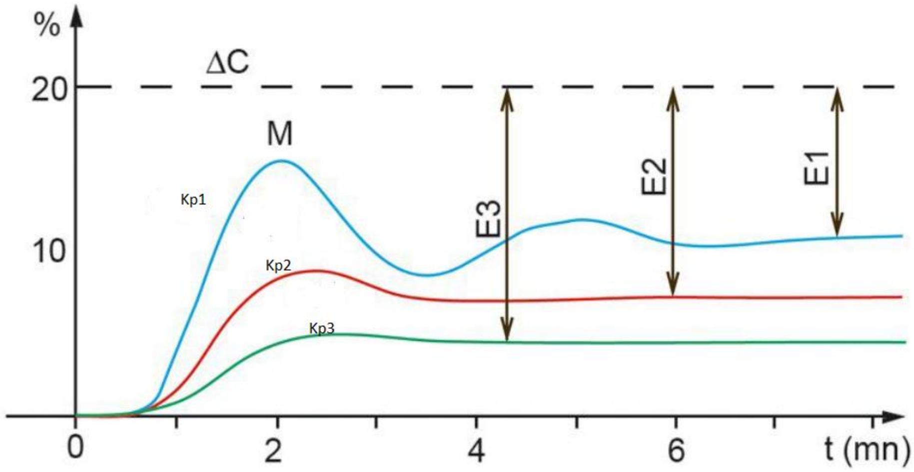
- Stabiliser la mesure au point de fonctionnement.
- Mettre le régulateur en P seul, (Ti = max et Td = 0).
- Afficher un gain Kp faible (Kp < 1).
- Egaler la consigne à la mesure, passer le régulateur en automatique.
- Effectuer un échelon de consigne de 5 à 10 %.
- Observer l'enregistrement de l'évolution du signal de mesure.
- Si elle est sûr amortie (apériodique), augmenter le gain Kp (ou diminuer BP %).

- Si elle présente plus de deux oscillations, diminuer le gain Kp (ou augmenter BP%).

Au cours des réglages, les observations suivantes peuvent être faites

- La mesure ne rejoint pas la consigne

- L'écart diminue avec le gain mais la stabilité se dégrade



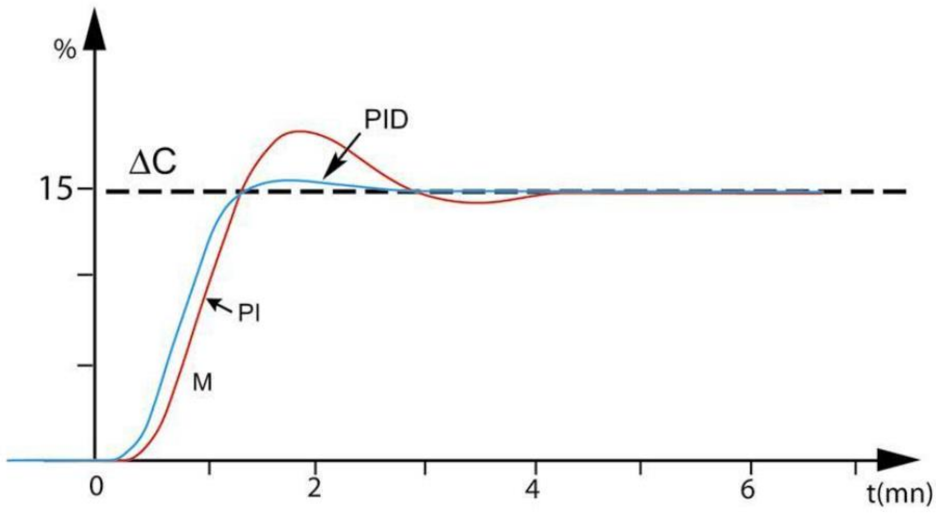
Effet de l'action proportionnelle

2.1.2. Réglage de l'action dérivée

L'action dérivée ne se justifie que si la mesure a un certain retard.

- Conserver la valeur de l'action proportionnelle déterminée précédemment et l'intégrale minimale.
- Afficher une action dérivée faible (Td égal à quelques secondes (tr/3)).
- Egaler la consigne à la mesure, passer le régulateur en automatique.
- Effectuer un échelon de consigne de 5 à 10 %.
- Si la réponse ne s'amortie pas, augmenter Td.
- Si la réponse est oscillante ou si elle est plus lente, diminuer Td.
  - L'action dérivée a un effet anticipatif
  - L'action dérivée stabilise la réponse du procédé
  - La réponse s'accélère en augmentant l'action dérivée
  - Il faut trouver un compromis entre rapidité et stabilité.

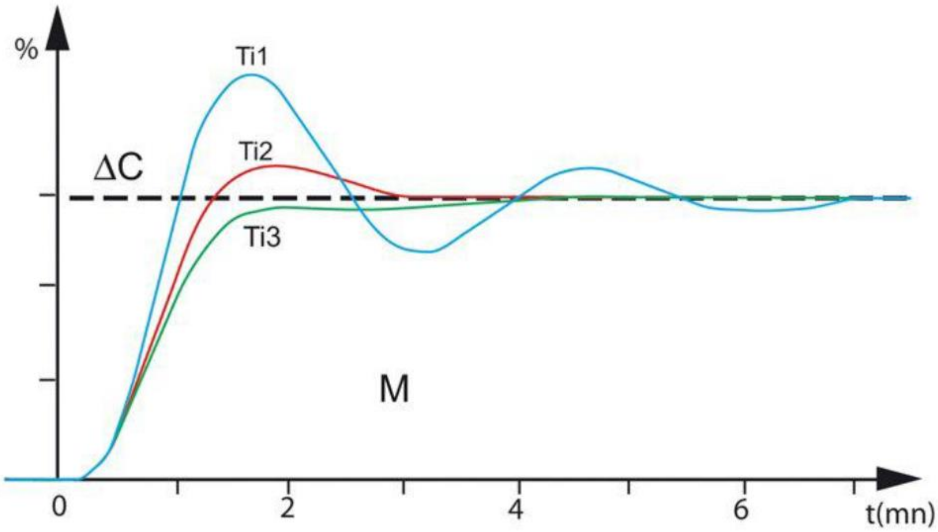
La présence de l'action dérivée, permet d'augmenter l'action proportionnelle



Effet de l'action dérivée

2.1.3. Réglage de l'action intégrale

- Conserver les valeurs des actions proportionnelle et dérivée déterminées précédemment.
- Afficher une action intégrale faible.
- Pour un premier essai afficher Ti = quelques minutes
- Egaler la consigne à la mesure, passer le régulateur en automatique.
- Effectuer un échelon de consigne de 5 à 10 %.
- Si la réponse est sûr amortie ou trop lente, diminuer Ti.
- Si la réponse présente un dépassement trop important, on augmente Ti.
  - L'action intégrale donne la précision statique
  - La mesure rejoint la consigne
  - La réponse s'accélère en augmentant l'action intégrale
  - Il faut trouver un compromis entre rapidité et stabilité



Effet de l'action intégrale

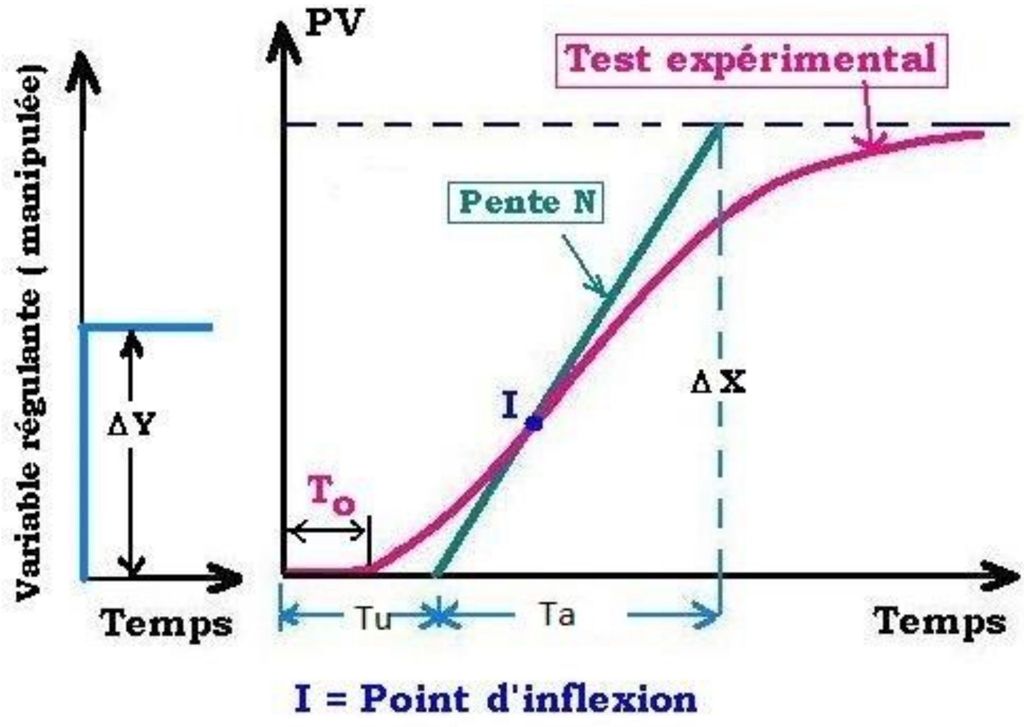
2.2. Méthodes de Ziegler-Nichols :

En 1942, Ziegler et Nichols ont proposé deux approches heuristiques basées sur leurs expériences et quelques simulations pour ajuster rapidement les paramètres des régulateurs P, PI et PID.

La première méthode nécessite l'enregistrement de la réponse indicielle en boucle ouverte, alors que la deuxième demande d'amener le système bouclé à sa limite de stabilité.

Il est important de souligner que ces méthodes ne s'appliquent en général qu'à des systèmes sans comportement oscillant et dont le déphasage en hautes fréquences dépasse −180 [◦]. Ces systèmes possèdent souvent un retard pur et/ou plusieurs constantes de temps. On les rencontre surtout dans les processus physicochimiques tels que la régulation de température, de niveau, de pression, etc

2.2.1. Méthode de Ziegler-Nichols en boucle ouverte (première méthode de Ziegler-Nichols)



Réponse indicielle du système à régler seul : on mesure les temps Tu et Tg

On suppose que l'échelon est lancé à l'instant 0.

Pour obtenir les paramètres du régulateur PID, il suffit d'enregistrer la réponse indicielle seul (c'est-à-dire sans le régulateur), puis de tracer la tangente au point d'inflexion ***I*** de la courbe. On mesure ensuite les temps **Tu** correspondant au point d'intersection entre l'abscisse et la tangente ainsi que le temps **Ta** ("temps de montée de la tangente ou simplement la pente de la tangente"), le gain statique du système est $K_0 = \frac{\Delta x}{\Delta y}$. Le modèle simplifié adopté pour le procéssus s'écrit alors comme suit :

$$G(p) = \frac{Y(p)}{U(p)} = \frac{K_0}{1+T_a p} e^{-T_u p}$$

On peut alors calculer les coefficients du régulateur choisi à l'aide du tableau suivant :

Régulateur	K	T_i	T_d
P	$\frac{T_a}{T_u}$	∞	0
PI	$0.9\ \frac{T_a}{T_u}$	$\frac{T_u}{0.3}$	0
PID	$1.2\ \frac{T_a}{T_u}$	$2\ T_u$	$0.5\ T_u$

Ajustage des gains de régulateurs P, PI et PID selon la première méthode de Ziegler-Nichols (en BO).

Généralement les gains proportionnels (Kp) proposés par Ziegler-Nichols sont trop élevés et conduisent à un dépassement supérieur à 20%. Il ne faut donc pas craindre de réduire ces gains d'un facteur 2 pour obtenir une réponse satisfaisante.

Exemple :

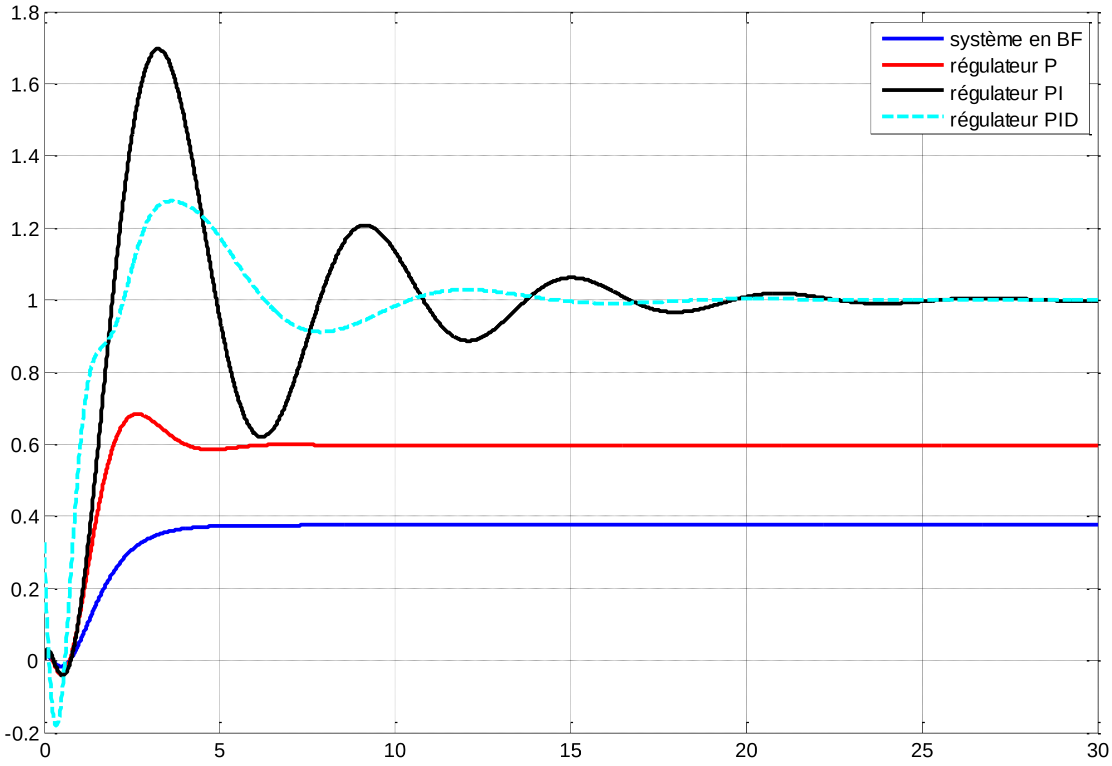
Considérons la réponse indicielle d'un système apériodique, on peut y mesurer :

$T_a = 2.1s$ et $T_u = 0.85s$.

Du tableau de Ziegler-Nichols, on tire les trois paramètres du régulateur P, PI et PID comme suit :

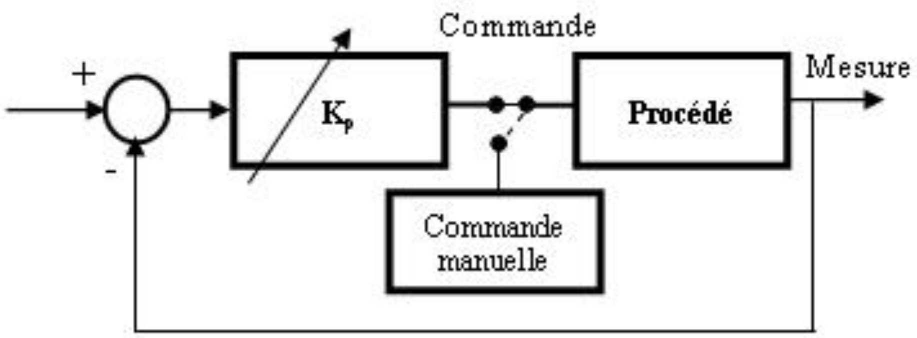
- Pour le régulateur P : $K_p = \frac{T_a}{T_u} = 2.4706$
- Pour le régulateur PI : $K_p = 0.9.\frac{T_a}{T_u} = 2.2235$ et $T_i = 3.33.T_u = 2.8333$
- Pour le régulateur PID : $K_p = 1.2.\frac{T_a}{T_u} = 2.9647$, $T_i = 2.T_u = 1.7000$ et $T_d = 0.5.T_u = 0.4250$

La division par 2 permet d'obtenir une réponse indicielle tout à fait satisfaisante en boucle fermée.

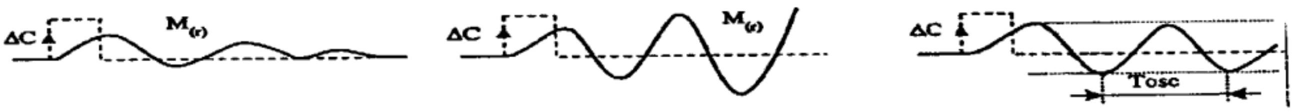


2.2.2. Méthode de Ziegler-Nichols en boucle fermée (seconde méthode de Ziegler-Nichols)

La méthode de Ziegler et Nichols en boucle fermée consiste à déterminer la limite de pompage du système en boucle fermée. Le pompage est défini par l'apparition d'oscillations entretenues et en général indésirables.



Cette méthode nécessite alors de boucler le système sur un simple régulateur proportionnel dont on augmente le gain jusqu'à amener le système à osciller de manière permanente ; on se trouve ainsi à la limite de stabilité du système.



GR trop petit ou BP% trop grand — GR trop grand ou BP% trop petite — GR correct BP% correcte

Après avoir relevé le gain critique Kc et la période d'oscillation Tc de la réponse. on peut calculer les paramètres du régulateur choisi à l'aide du tableau suivant :

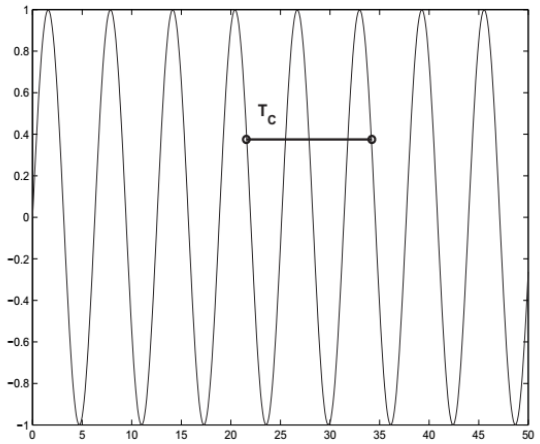


figure 6.16: Ziegler-Nichols en boucle fermée : pompage

Régulateur	P	PI série	PI //	PID série	PID //	PID mixt
K_p	$\frac{K_c}{2}$	$\frac{K_c}{2.2}$	$\frac{K_c}{2.2}$	$\frac{K_c}{3.3}$	$\frac{K_c}{1.7}$	$\frac{K_c}{1.7} \simeq 0.6K_c$
T_i	Max	$\frac{T_c}{1.2}$	$\frac{2T_c}{K_c}$	$\frac{T_c}{4}$	$\frac{0.85T_c}{K_c}$	$\frac{T_c}{2} = 0.5T_c$
T_d	0	0	0	$\frac{T_c}{4}$	$\frac{K_cT_c}{13.3}$	$\frac{T_c}{8} = 0.12T_c$

Les valeurs proposées par Ziegler et Nichols ont été testées dans de très nombreuses situations et il faut souligner qu'ici également elles conduisent à un temps de montée relativement court assorti d'un dépassement élevé.

Dans ce cas, le régulateur PID (mixte) obtenu à une fonction de transfert comme suit :

$$C(p) = K\left(1 + \frac{1}{T_i p + T_d p}\right) = 0.6K_c\left(1 + \frac{1}{0.5T_c p} + 0.12T_c p\right)$$
$$= \frac{1.2K_c}{T_c p}\left[0.06T_c^2 p^2 + 0.5T_c p + 1\right]$$

Cette situation n'étant pas toujours satisfaisante, on est amené à corriger légèrement les coefficients proposés et, en particulier, à diminuer le gain Kp.

Exemple :

Soit un système de fonction de transfert en boucle ouverte :

$$G(p) = \frac{1}{p(p+2)(p+3)}$$

On cherche à déterminer un correcteur PID pour ce système, à l'aide de la deuxième méthode de Ziegler et Nichols. Pour cela, on considère dans un premier temps que l'on associe le système de fonction de transfert $G(p)$ à un correcteur P, dans une boucle fermée à retour unitaire. On détermine ensuite la valeur du gain K_c du correcteur qui produit une limite de stabilité, de la manière suivante :

La fonction de transfert en boucle fermée est : $F(p) = \frac{K}{p^3+5p^2+6p+K}$.

Le critère de Routh appliqué à ce système donne :

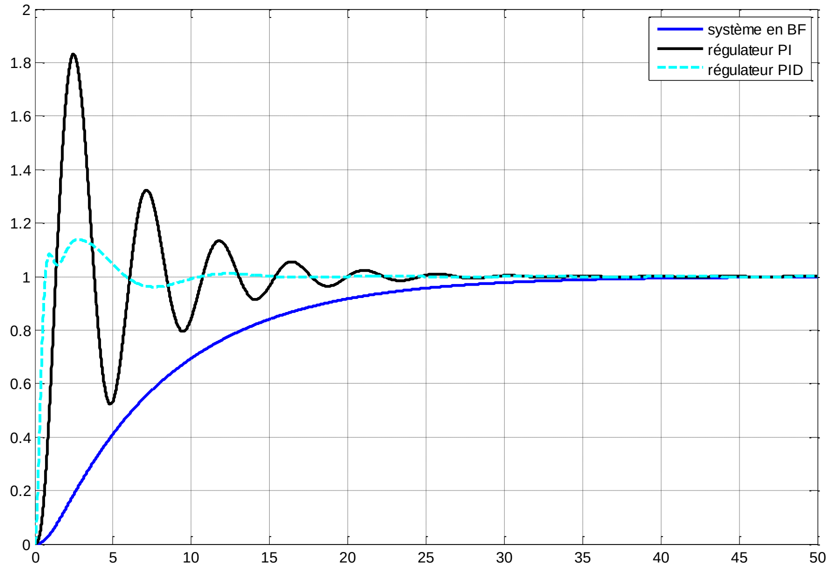
$$\begin{array}{c|c|cc} p^3 & 1 & 6 & 0 \\ p^2 & 5 & K & 0 \\ p^1 & \frac{30-K}{5} & 0 & 0 \\ p^0 & K & 0 & 0 \end{array}$$

donc $K_c = 30$.

Afin de déterminer la période des oscillations T_c, on va en calculer la pulsation ω_c, en annulant simplement l'équation caractéristique associée à la fonction de transfert du système en boucle fermée : $(\jmath\omega_c)^3 + 5(\jmath\omega_c)^2 + 6\jmath\omega_c + 30 = 0$ ou bien encore : $(30 - 5\omega_c^2) + \jmath\omega_c(6 - \omega_c^2) = 0$ qui donne : $\omega_c^2 = 6$ et donc $T_c = \frac{2\pi}{\omega_c} = \frac{2\pi}{\sqrt{6}}$

Le correcteur PID proposé par Ziegler et Nichols a pour paramètres :

$$K = 0.6K_c = 1.8$$
$$T_i = 0.5T_c = 1.280$$
$$T_d = 0.12T_c = 0.308$$



2.3. Méthode de Chien-Hrones-Reswick

- Chien, Hornes et Reswick ont également proposé une méthode de synthèse des correcteurs basée sur la même réponse apériodique en boucle ouverte que Ziegler et Nichols (donc en boucle ouverte).
- Cette méthode représente une amélioration de la méthode de Ziegler-Nichols temporelle, pour obtenir des systèmes plus amortis en boucle fermée. (le critère étant un dépassement de 0ou 20 %).
- Leurs résultats sont résumés par le tableau suivant. Ces résultats permettent d'obtenir un système en boucle fermée à réponse soit apériodique (régulation), soit avec un premier dépassement de l'ordre de 20% (poursuite).

		Comportement apériodique (+ régulation)	$D_1\% = 20\%$ (en poursuite)
P	K	$0.3\frac{T_a}{T_u}$	$0.7\frac{T_a}{T_u}$
PI	K	$0.6\frac{T_a}{T_u}$	$0.7\frac{T_a}{T_u}$
	T_i	$4T_u$	$2.3T_u$
PID	K	$0.95\frac{T_a}{T_u}$	$1.2\frac{T_a}{T_u}$
	T_i	$2.4T_u$	$2T_u$
	T_d	$0.42T_u$	$0.42T_u$

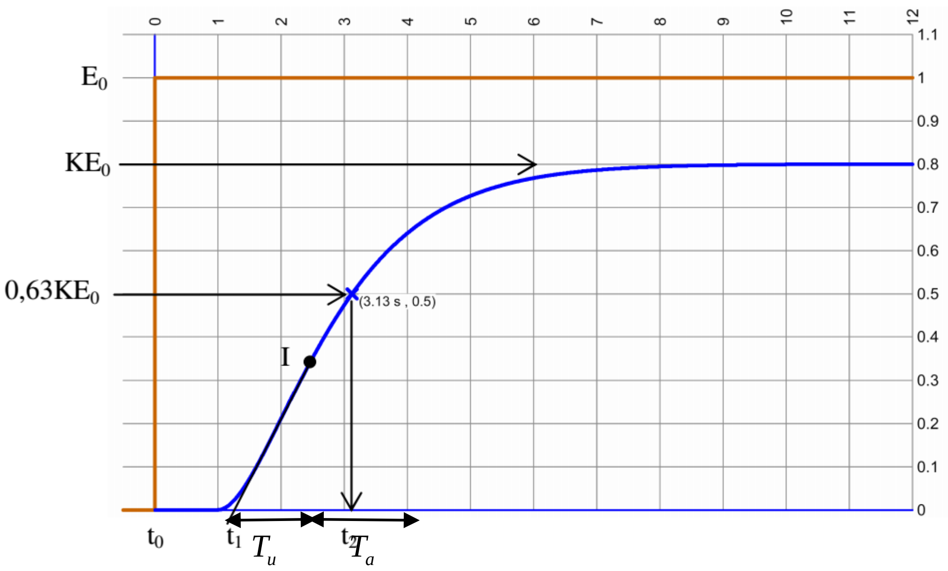
Méthode de Chien, Hornes et Reswick

t

2.4. Méthode de Cohen-Coon

(Elle est dans la classe des méthodes de placement des pôles, car elle cherche à positionner
les pôles dominants de la boucle fermée pour obtenir un rapport de décroissance de d = 1/4.

Elle utilise le modèle de Broïda et la détermination des paramètres est donnée par :



On détermine KE_0, d'où K. On trace $0{,}63KE_0$, ce qui nous donne t_2. On identifie le point d'inflexion I et on trace la tangente à l'origine à la courbe qui passe par I. L'intersection entre cette tangente et l'axe des temps, donne le temps t_1. t_0 est le temps où l'échelon apparaît. On

On obtient alors : $T_u = t_1 - t_0$, $T_a = t_2 - t_1$ et $\beta = \dfrac{t_1}{t_2}$

On peut alors déterminer les paramètres des régulateurs suivant le Tableau suivant

	P	PD	PI	PID
K_r	$\frac{\tau}{KT}\left(1+\frac{0;35\beta}{1-\beta}\right)$	$\frac{1,24\tau}{KT}\left(1+\frac{0,13\beta}{1-\beta}\right)$	$\frac{0,9\tau}{KT}\left(1+\frac{0,92\beta}{1-\beta}\right)$	$\frac{1,35\tau}{KT}\left(1+\frac{0,18\beta}{1-\beta}\right)$
τ_i	————	————	$\frac{3,3-3\beta}{1+1,2\beta}T$	$\frac{2,5-2\beta}{1-0,39\beta}T$
τ_d	————	$\frac{0,27-0,36\beta}{1-0,87\beta}T$	————	$\frac{0,37-0,37\beta}{1-0,81\beta}T$

Tableau 2 : détermination des paramètres des correcteurs avec la méthode de Cohen-Coon

c

Cette méthode génère un faible coefficient d'amortissement D, ce qui signifie que la boucle fermée est mal amortie et qu'elle est très sensible aux variations.